SCIENCE
OUVERTE

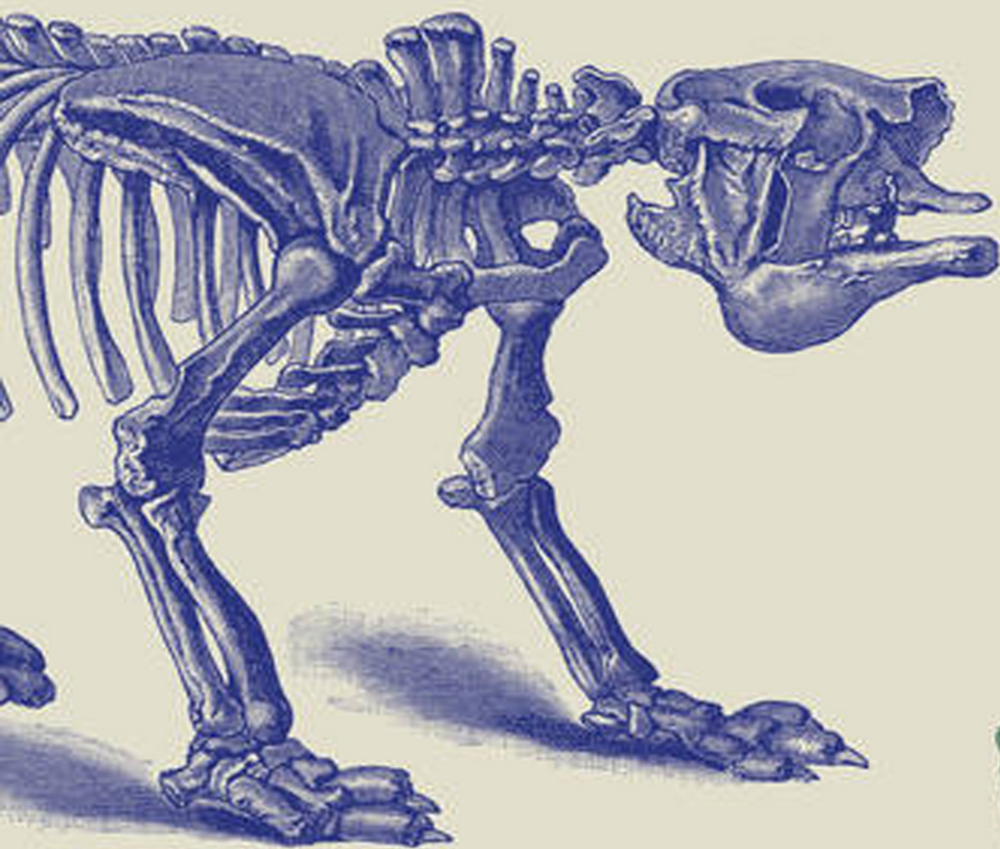


Seuil

CHARLES FRANKEL

Extinctions

Du dinosaure à l'homme





CHARLES FRANKEL

EXTINCTIONS

Du dinosaure à l'homme

ÉDITIONS DU SEUIL
25, bd Romain-Rolland, Paris XIVe

www.frenchpdf.com

CHARLES FRANKEL

EXTINCTIONS

Du dinosaure à l'homme

ÉDITIONS DU SEUIL
25, bd Romain-Rolland, Paris XIVe

www.frenchpdf.com

DU MÊME AUTEUR

La Vie sur Mars

Seuil, « Science ouverte », 1999

La Mort des dinosaures

L'hypothèse cosmique

Seuil, « Points Sciences », 1999

Terre de France

Une histoire de 500 millions d'années

Seuil, « Science ouverte », 2007

et « Points Sciences » nº 194, 2010

L'Homme sur Mars

Science ou fiction ?

Dunod, « Quai des sciences », 2007

Vous êtes ici !

Les idées clés pour comprendre notre planète

Dunod, « Oh, les sciences ! », 2008

Dernières nouvelles des planètes

Seuil, « Science ouverte », 2009

Terre de vignes

Seuil, « Science ouverte », 2011

et « Points Sciences » nº 211, 2013

Guide des cépages et terroirs

Delachaux et Niestlé, 2013

Vins de feu

À la découverte des terroirs des volcans célèbres

Dunod, 2014

www.frenchpdf.com

ISBN 978-2-02-115645-4

© ÉDITIONS DU SEUIL, OCTOBRE 2016

www.seuil.com

Ce document numérique a été réalisé par Nord Compo .

www.frenchpdf.com

TABLE DES MATIÈRES

Titre
Du même auteur
Copyright
Avant-propos
1 - La biodiversité en danger
Vie et mort des espèces
Combien d'espèces aujourd'hui ?
Les espèces sont mortelles
Cinq grandes extinctions
Crise de la fin de l'Ordovicien (445 m.a.)
Crise de la fin du Dévonien (372 m.a.)
La crise de la fin du Permien (252 m.a.)
Crise de la fin du Trias (200 m.a.)
2 - La fin des dinosaures
Une crise mondiale
Une mystérieuse couche d'argile
L'hypothèse cosmique
Impact contre volcans
La découverte du cratère
Portrait du meurtrier
Les remous médiatiques
Scénario d'un désastre : effets régionaux
Scénario d'un désastre : effets mondiaux
L'effet de cible
Victimes et survivants
La chance des mammifères
3 - L'essor des mammifères
Les trente glorieuses
Réchauffement climatique : un mystérieux précédent
Après le chaud : le froid !
Changement de faune radical
Pourquoi la Terre s'est-elle refroidie ?
Naissance du genre humain
L'âge glaciaire
4 - L'homme entre en scène : premiers massacres
La mégafaune
L'homme face au génocide
Le cas troublant de l'Afrique
La situation en Europe
L'Amérique se met à table
Le cas de l'Australie
Le verdict : l'homme coupable
5 - Ampleur des extinctions actuelles
Madagascar et Nouvelle-Zélande
Comment massacrer les oiseaux
Extinction des oiseaux : où en sommes-nous ?
L'extinction des mammifères
Amphibiens et reptiles
Bilan des insectes : des durs à cuire ?
Au royaume des plantes
Le sursis des poissons
Coquillages et crustacés
6 - Espèces menacées : une situation critique
La chute des populations : l'exemple de l'éléphant
Insectes et poissons : début de l'hécatombe
Destruction de l'habitat : l'exemple du tigre
La forêt amazonienne
La liste rouge des espèces menacées
En danger critique
La liste s'allonge
Compte à rebours vers la grande extinction
7 - Réchauffement climatique et autres effets pervers

www.frenchpdf.com

L'homme responsable du réchauffement climatique
Effet de serre et biosphère
La migration comme réponse au réchauffement
La marche forcée des espèces
Vers des scénarios catastrophes
Le dépérissement des océans
8 - Comment freiner les extinctions
Le fond du problème
La protection de l'habitat
Les bénéfices de la biodiversité
Rebâtir l'écosystème
Vers la résurrection
Épilogue Sommes-nous menacés d'extinction ?
L'éruption du Toba
Pandémie et guerre bactériologique
L'homme contre l'homme
Le surhomme contre l'homme
Surveiller les astéroïdes
Mars : notre assurance tous risques
Le silence du cosmos
Bibliographie
Livres
Articles de recherche
Index
A
B
D
E
F
G
H
I
J
K
L
M
N
O
P
Q
R
S
T
U
V
W
X
Y
Z

www.frenchpdf.com

Avant-propos

L'homme est aujourd'hui confronté à un effritement de la biodiversité terrestre : de nombreuses espèces emblématiques vacillent au bord de l'extinction, que ce soit l'éléphant et le rhinocéros en Afrique, le tigre en Asie, les lémuriens à Madagascar, ou encore notre seule antilope eurasienne – le saïga – dans les steppes du Kazakhstan.

Elles ne sont que la partie visible de l'iceberg. Les amphibiens sont en chute libre partout dans le monde ; les insectes disparaissent avant même d'avoir été catalogués ; et les plantes viennent grossir la liste des espèces menacées. Ces tendances sont tellement inquiétantes que nombre de chercheurs parlent aujourd'hui d'une sixième « extinction en masse » du monde vivant, pour comparer son ampleur à celle des cinq autres effondrements de la biosphère qui ont marqué l'histoire de la Terre. La dernière grande crise, celle de la fin des dinosaures, il y a 66 millions d'années, a vu les trois quarts de toutes les espèces de l'époque disparaître, balayées en un clin d'œil, comme on va le voir, par l'impact d'un astéroïde.

À l'échelle géologique, c'est également en un clin d'œil que disparaissent les espèces actuelles, et là aussi on a identifié un coupable : malgré nos protestations, il s'agirait de notre propre espèce *Homo sapiens* et de sa civilisation.

Ce livre a pour objectif de faire le bilan de la dégradation actuelle de l'écosystème terrestre, en la plaçant dans une perspective globale : d'où venons-nous, où allons-nous, et que pouvons-nous faire pour infléchir le cours des événements et maintenir en bonne santé la précieuse biodiversité terrestre ?

Il était donc judicieux de commencer par la dernière extinction en date, celle de l'ère des dinosaures, pour planter le décor : la biosphère terrestre a évolué en grands cycles, entrecoupés d'inflexions brutales qui ont orienté le cours de l'évolution. L'extermination des dinosaures est ainsi le point de départ d'une nouvelle aventure qui a vu l'essor des mammifères, menant *in fine* à la prise de pouvoir du genre humain au sommet de l'écosystème.

Après un chapitre d'introduction, cette inflexion ou « extinction en masse » de la fin du Crétacé constitue donc le deuxième chapitre de ce livre, d'autant qu'elle a longtemps déconcerté les chercheurs. Cette enquête, digne d'un roman policier, débouche sur la mise en cause d'un impact cosmique : comme quoi l'histoire de la vie sur Terre tient parfois à un fil, en l'occurrence à la trajectoire malencontreuse d'un bloc de roche égaré dans le cosmos.

Le troisième chapitre raconte le rétablissement de l'écosystème à partir d'un petit groupe de survivants, et l'histoire peu connue de l'essor des mammifères, qui a été mouvementée : un réchauffement climatique spectaculaire et encore inexpliqué a réorienté l'évolution il y a 55 millions d'années, suivi d'un refroidissement global imputé à l'englacement de l'Antarctique, puis du Groenland. C'est au cœur de ces crises climatiques à répétition qu'une branche de primates en Afrique de l'Est a entrepris un spectaculaire rayonnement évolutif, accouchant à terme du genre humain.

Une fois notre espèce aux commandes de la planète, le quatrième chapitre attaque un nouveau mystère : l'extinction rapide, 50 000 ans à 10 000 ans avant l'époque actuelle, de la plupart des gros animaux sur Terre – mammouths et mastodontes, rhinocéros laineux et autre paresseux géants. On a longtemps tenté d'attribuer cet effondrement de la « mégafaune » à une crise climatique, mais nous verrons que le dossier à charge d'*Homo sapiens* est particulièrement accablant : nos ancêtres avaient commencé là cette sixième extinction en masse qui menace notre biosphère.

Le cinquième chapitre décrit la seconde étape de la crise actuelle : la vague d'extinctions qui a marqué, à partir du XVIe siècle, le rayonnement de l'homme « civilisé » à travers le Pacifique et l'océan Indien. Au cours de ces grands voyages de découverte, les extinctions d'animaux comme le dodo de l'île Maurice furent longtemps contées sur le ton de l'anecdote : ces espèces inadaptées « méritaient » de disparaître. On sait aujourd'hui qu'elles étaient seulement inadaptées aux ravages d'une civilisation irresponsable : le débarquement des explorateurs, de leurs chiens et de leurs rats a sans doute mené à l'extermination de près de 1 000 espèces d'oiseaux (soit 10 %) en moins de deux siècles.

Le sixième chapitre nous amène au cœur du problème actuel : les continents sont touchés à leur tour, sous le coup de la surexploitation des ressources et du braconnage, de la déforestation et de l'agriculture intensive, et des espèces invasives que nous distribuons aux quatre coins de la planète. Nous dressons ici le bilan des espèces menacées : s'il faudra encore plusieurs siècles au rythme actuel pour exterminer autant d'espèces que l'a fait l'astéroïde de la fin des dinosaures, nous en prenons malgré tout le chemin.

La situation est d'autant plus problématique, souligne le septième chapitre, que les courbes d'extinction ne sont pas linéaires : elles peuvent devenir exponentielles par des effets en cascade et l'entrée en jeu de facteurs amplificateurs. Le réchauffement climatique en est un, qui affecte terre et mer : longtemps épargné, désormais dévasté par la surpêche, l'océan est doublement menacé par le réchauffement et par l'acidification des eaux que

www.frenchpdf.com

causent nos rejets de dioxyde de carbone.

Comment éviter l'implosion de la biosphère ? Le huitième chapitre montre que rien n'est perdu – sauf les espèces déjà disparues – mais qu'il faut agir vite et à tous les niveaux. Ce n'est pas seulement des politiciens que viennent les réponses, malgré leur prise de conscience des dérèglements et leurs tentatives d'y remédier, mais aussi de chacun d'entre nous, à travers notre style de vie, et la gestion de notre consommation personnelle : la culture intelligente de notre « jardin », au sens propre comme au sens figuré. Comme la survie de notre civilisation, et peut-être même de notre propre espèce en dépend, le jeu en vaut bien la chandelle.

Même si nous redressons la situation, il n'est pas dit non plus que notre espèce continuera éternellement sa route. Dans un épilogue un peu plus spéculatif que le reste du livre, on peut s'interroger sur la durée de vie de l'espèce humaine et les scénarios d'extinction que nous aurons à déjouer si nous voulons poursuivre notre aventure encore quelques siècles ou, si nous sommes très sages, quelques centaines de milliers d'années. Nous pourrions même quitter notre berceau planétaire et rayonner à travers la Galaxie, mais pour cela il faut d'abord apprendre à mieux gérer la Terre.

En préparant ce livre, j'ignorais ce que j'allais découvrir au fil de son écriture : étions-nous vraiment sur le chemin d'une grande extinction ? Quels étaient les véritables chiffres et les tendances à court terme ? Sans prétendre être objectif, j'étais ouvert à tout, et j'espère que le lecteur ressentira cette atmosphère d'enquête au fil des pages.

Les travaux de recherche sur lesquels je me suis fondé sont publiés principalement en anglais : je les cite en bibliographie. De nombreux sites officiels sont également consultables en ligne, pour se tenir à jour de l'évolution de la liste des espèces menacées, en particulier les sites de l'UICN (Union internationale pour la conservation de la nature).

Un grand merci aux photographes qui ont rendu publiques leurs œuvres, notamment à travers Wikimedia Commons, et que nous avons reproduites, ainsi qu'à l'équipe du Seuil pour les graphiques et schémas. Merci enfin à Jean-Marc Lévy-Leblond pour son attachement à ce projet, dans le cadre de sa collection « Science ouverte », son œil critique et ses judicieuses recommandations. Ce fut un plaisir de travailler avec une équipe si enthousiaste et professionnelle, avec Sophie Lhuillier et Charles Olivero à la correction et Bruno Ringeval à la mise en page.

Si ce livre peut convaincre le lecteur de la sévérité de cette crise de la biodiversité, de la menace supplémentaire que fait peser sur elle le réchauffement climatique, et que nous pouvons tous y apporter des solutions, nous aurons atteint notre objectif.

à Landaul, Morbihan,
le 1er juin 2016.

www.frenchpdf.com

1

La biodiversité en danger

Le constat est troublant : l'écosystème terrestre – les plantes, les animaux et les rapports qu'ils tissent entre eux – semble sur le point de s'effondrer comme un château de cartes. La responsabilité de ce désastre en devenir échoit à la civilisation humaine au travers de l'expansion de sa population, de son agriculture et de son industrie, de la déforestation et du morcellement de l'habitat, du dérèglement climatique et de l'acidification des océans.

Pour ceux – et ils sont nombreux – qui considèrent ce cri d'alarme comme une exagération, une certaine rhétorique voudrait que la Terre en ait vu d'autres, que l'histoire de l'évolution soit émaillée de baisses de la biodiversité, mais également de redressements tout aussi spectaculaires. Au demeurant, a-t-on besoin de toutes ces espèces ? Au dire des spécialistes, on connaît moins de la moitié des plantes et des animaux qui peuplent aujourd'hui la planète, et on ne s'en porte pas plus mal. Alors, en quoi perdre quelques dizaines de pour-cent de la faune et de la flore pourrait-il nous toucher ?

Face à ces deux courants de pensée – un alarmisme fondé sur le déclin constaté des espèces et un relativisme qui tente de noyer le poisson – l'opinion publique est divisée. Et comme souvent dans ce genre de débat, un fossé se creuse entre les spécialistes, qui récoltent et analysent les informations, et le public qui en reçoit une version simplifiée et souvent déformée par les médias et les groupements d'intérêt.

Un sondage effectué en 1998 – qu'il serait intéressant de renouveler aujourd'hui – a demandé à 400 chercheurs, membres de l'Institut américain des sciences biologiques en l'occurrence, de classer par ordre d'importance les périls divers auxquels notre environnement est confronté. Déjà à cette époque, la disparition des espèces vivantes est arrivée en tête, loin devant la pollution et le réchauffement climatique. En revanche, moins de 50 % du public sondé en parallèle considérait le déclin des espèces comme représentant une quelconque menace pour la planète : comme quoi le public était réellement sous-informé à la fin du xx e siècle, ou bien ne se sentait pas concerné.

Pour en revenir aux spécialistes, le sondage de 1998 fait ressortir que 70 % des chercheurs estimaient qu'une extinction « de masse » du monde vivant était en cours : ils s'étaient même avancés à prévoir que 20 % des espèces (une espèce sur cinq) disparaîtraient en l'espace de trente ans, c'est-à-dire à l'horizon 2028.

Nous sommes à mi-chemin de cette funeste prédiction et il est temps de faire le bilan. Pour cela, il convient d'abord de présenter les rouages du monde vivant et de la biodiversité, et notamment le concept d'extinction « de masse » qui est invoqué lorsqu'un nombre très élevé d'espèces disparaissent (plus de 50 %), comme cela est arrivé jusqu'à présent cinq fois seulement dans l'histoire de la Terre.

La crise actuelle pourrait bien atteindre une ampleur comparable. En se projetant dans l'avenir sur la base des chiffres actuels, on peut même se demander au bout de combien de temps on atteindra ce seuil critique qui nous ferait rejoindre dans les bilans la crise de la fin des dinosaures, il y a 66 millions d'années. L'espèce humaine pourrait-elle survivre à un tel effondrement de la biosphère ? Sommes-nous des dinosaures en devenir ?

On n'en est pas encore là, mais il est grand temps de s'inquiéter. Comme l'a souligné Michael Novacek, conservateur au Muséum d'histoire naturelle de New York : « Aucune autre génération de chercheurs dans l'histoire de notre civilisation ne s'est retrouvée avec pareil défi à relever ; aucune autre génération ne s'est ainsi retrouvée à la croisée des chemins, entre le maintien de la biodiversité sur Terre et une destruction irrévocable de celle-ci. Notre responsabilité, en tant que chercheurs, est ni plus ni moins de monter un projet scientifique aussi complexe et colossal que de poser un homme sur la Lune, et dont l'objectif ultime est d'assurer que la vie, telle que nous la connaissons, continue d'exister[1]. »

On le verra : il n'y a pas que les chercheurs et les décideurs qui peuvent et doivent s'embarquer dans cette croisade. Nous avons tous notre mot à dire et nous pouvons tous participer au redressement de la biosphère.

Auparavant, il convient de planter le décor et de présenter les acteurs. Qu'est-ce que la biodiversité ? Qu'est-ce qu'une espèce vivante et combien y en a-t-il sur Terre ? À quel rythme naissent et meurent ces espèces ?

Vie et mort des espèces

Une espèce vivante est un groupe d'individus – plantes, animaux, moisissures ou microbes – qui partagent les mêmes caractéristiques, caractéristiques qui la différencient des autres espèces. Lorsqu'il y a reproduction sexuée en particulier, une espèce regroupe tous les individus qui peuvent se reproduire entre eux et dupliquer ces

www.frenchpdf.com

caractéristiques (tout en permettant par mutations de légères modifications d'une génération à l'autre), alors qu'ils ne peuvent pas avoir de descendance en dehors du groupe.

Ainsi le chat (*Felis silvestris*) constitue-t-il une espèce. Il y a une certaine variété au sein du groupe – taille, longueur et couleur du poil, couleur des yeux – mais ils ont tous le même squelette et les mêmes organes, et tous les chats peuvent se reproduire entre eux et avoir une descendance fertile. L'homme (*Homo sapiens*) constitue pareillement une seule et même espèce : il n'y a pas de barrière de reproduction entre groupes d'individus de différents continents, qui contribuent tous à un même pool génétique.

Au fil du temps, une espèce peut toutefois se démultiplier en plusieurs espèces distinctes. Le cheval et l'âne descendent ainsi d'un ancêtre commun : un équidé qui vit son groupe se séparer, il y a environ 4 millions d'années, en deux populations évoluant chacune de son côté. À partir de différences minimes, amplifiées d'une génération à la suivante, se sont établies deux espèces suffisamment différentes au bout du compte pour qu'elles ne puissent plus se croiser et avoir de descendance fertile[2].

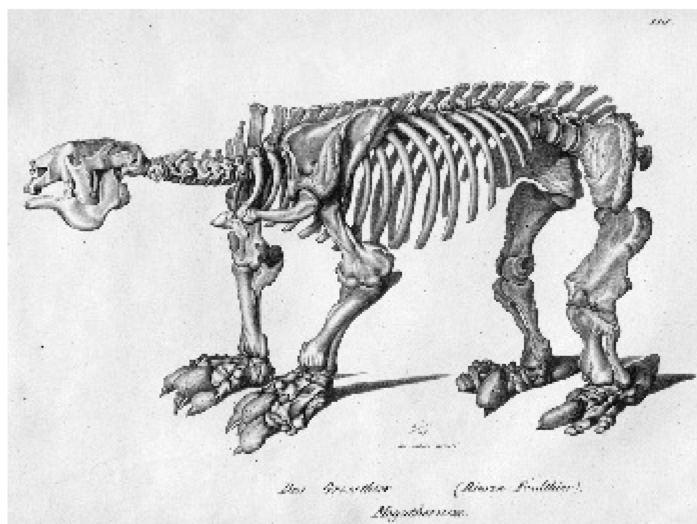
De petites variations dues à la loterie de la reproduction et à l'isolation de groupes aux caractéristiques divergentes mènent donc à un bourgeonnement des espèces dont le nombre est amené à croître au fil du temps. On représente souvent ce foisonnement sous la forme d'un arbre généalogique – on dit « phylogénique » lorsqu'il s'agit d'espèces – avec un tronc, des embranchements et des ramifications de plus en plus fines et multiples qui portent à leurs extrémités toutes les espèces actuelles.

À ce jeu, on pourrait penser que le nombre d'espèces ne peut qu'augmenter, et en première approximation c'est bien ce qui se passe depuis l'apparition des premières formes de vie sur Terre, il y a 4 milliards d'années.

Il y a toutefois un frein à cette expansion : les espèces ne sont pas à l'abri d'accidents. Comme les individus qui les constituent, elles sont mortelles. En fait, c'est bien simple : une espèce meurt lorsque tous ses individus disparaissent.

Aussi évident que cela puisse paraître aujourd'hui, ce ne fut pas une idée facile à accepter dans l'histoire des sciences, surtout au regard de certains dogmes religieux. Selon la religion judéo-chrétienne en particulier, la Création ne pouvait qu'être parfaite et aucun animal ne devait donc disparaître – ce qui aurait constitué un échec pour son créateur. Même lors de ses grandes colères, comme le déluge biblique, la sauvegarde de toutes les espèces devait être assurée – mission remplie par Noé et son arche.

La découverte d'ossements spectaculaires (ceux des mammouths et autres gros animaux de l'âge glaciaire), qui n'appartenaient pas aux espèces actuelles, a toutefois jeté le trouble, laissant percer le doute lancinant que certains animaux n'auraient pas survécu au déluge biblique. Cet avis était loin d'être partagé par tous, nombre de penseurs se persuadant que ces animaux inconnus finiraient bien par être découverts quelque part sur Terre où ils se seraient réfugiés. On s'attendait ainsi à retrouver le cerf géant *Megaloceros*, aux bois de trois mètres d'envergure, dans quelque coin reculé d'Europe. De même Thomas Jefferson (1743-1826), troisième président des États-Unis et grand collectionneur de fossiles, pria les explorateurs Lewis et Clark de retrouver le paresseux géant lors de leur reconnaissance du Grand Ouest américain, voire un mammouth par la même occasion.



Retrouvé sous forme fossile en Amérique du Nord à partir du XVIIIe siècle, le paresseux géant a fasciné les chercheurs de l'époque, qui se refusaient à croire que l'espèce avait disparu et s'attendaient à le retrouver dans quelque coin inexploré du continent. (Extrait de K. J. Brodtmann, *Naturhistorische Abbildungen der Saeugethiere*, Zurich, Brodtmann éditeur, 1824, collection du Musée des Confluences, Lyon.)

www.frenchpdf.com

Le recensement de fossiles de plus en plus nombreux, sans survivants actuels, allait pourtant convaincre petit à petit la communauté scientifique que les extinctions étaient bel et bien une réalité du monde vivant. Du reste, avec les voyages de découverte à travers le Pacifique et l'océan Indien, les explorateurs se heurtèrent directement au processus d'extinction, puisqu'ils en devinrent eux-mêmes les acteurs : à force de chasser sur les îles des oiseaux sans méfiance et sans défense, comme le dodo de l'île Maurice, ils en exterminèrent un certain nombre.

Petit à petit s'est donc imposée l'idée que la biosphère terrestre n'est pas un casting figé dans le temps, mais un système dynamique où de nouvelles espèces surgissent constamment du brassage génétique, et d'autres disparaissent. Tout au plus peut-on supposer qu'à ce jeu, il y a plus d'espèces qui s'ajoutent au générique au fil du temps qu'il n'y en a qui s'en effacent, et qu'au bilan le nombre d'espèces a progressivement augmenté au cours des temps géologiques. Cela paraît être le cas en gros, mais on verra qu'il y a eu de sérieux accidents de parcours, quand le total des espèces a sérieusement chuté – accidents ou « grandes extinctions de masse » qui sont justement le sujet de ce livre.

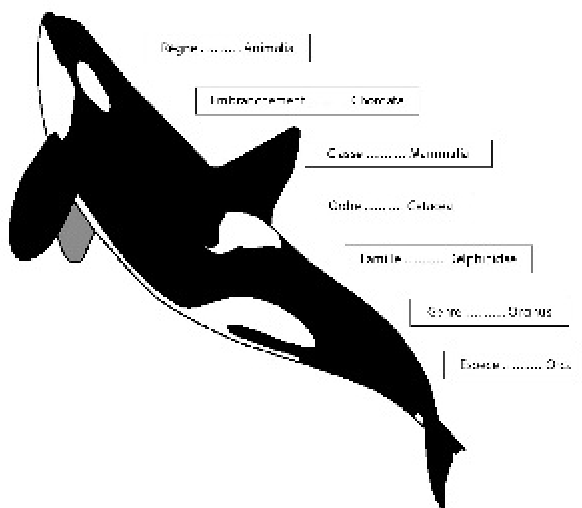
Combien d'espèces aujourd'hui ?

On pourrait penser qu'il est assez facile de nos jours, avec les moyens dont on dispose, de compter les espèces.

Ce n'est pas le cas. Même pour les mammifères et les oiseaux – espèces emblématiques qui ne passent pourtant pas inaperçues – le recensement est loin d'être terminé. Il suffit de préciser qu'à l'aube des années 1900 n'étaient identifiées que 3 000 espèces de mammifères, et qu'en 2016 on approche de la barre des 6 000 : les découvertes continuent au rythme d'une trentaine de nouvelles espèces par an. Même constat pour les plantes : si 250 000 espèces ont été cataloguées, les estimations font valoir qu'il en reste encore 50 000 au moins à découvrir.

D'autres classes du monde vivant sont encore plus loin d'être correctement recensées, comme les insectes. Alors que près d'un million d'espèces sont cataloguées, ce qui est déjà énorme, les spécialistes estiment qu'il en reste encore cinq à six millions à découvrir, notamment dans les forêts tropicales.

En ce qui concerne les espèces marines, le travail de prospection et de catalogage demeure là aussi partiel, en raison des conditions de travail complexes et coûteuses, que ce soit dans les barrières de corail, à la biodiversité remarquable, ou bien dans les grands fonds – plaines abyssales et volcans sous-marins – où les découvertes se succèdent sans discontinuer. Seules 230 000 espèces marines – du plancton à la baleine, en passant par les bivalves et les crustacés – sont décrites aujourd'hui, avec 70 000 spécimens supplémentaires en file d'attente dans les musées et les centres de recherche, que les spécialistes n'ont pas encore pu étudier par manque de temps et de moyens. Et ce n'est là que le sommet de l'iceberg, les estimations du nombre total d'organismes marins oscillant entre un et deux millions d'espèces.



Classification de l'orque (*Orcinus orca*)

Reste le royaume des mycètes : les moisissures et les champignons. Avec les insectes, c'est sans doute le groupe le moins connu de la biosphère terrestre (hormis les microbes), puisque 43 000 espèces sont recensées, alors que les estimations tournent autour de 600 000 à un million d'espèces : il en resterait 95 % à découvrir.

Que dire alors des bactéries ? Comme elles sont unicellulaires et microscopiques, on a tendance à les snober dans le recensement de la biosphère terrestre et à les comptabiliser séparément. C'est un peu cavalier, dans la mesure où elles représentent sans doute une bonne moitié de la biomasse terrestre (les êtres vivants jaugés selon leur

www.frenchpdf.com

poids total), qu'elles ont été les premières habitantes de la Terre et que les cellules des êtres complexes en sont dérivées.

Précisons donc qu'on a décrit et catalogué aujourd'hui plus de 10 000 espèces de bactéries et qu'il s'agit là aussi de la pointe de l'iceberg : chaque animal vertébré abrite plusieurs centaines à plusieurs milliers d'espèces bactériennes qui lui sont inféodées. On ne s'est évidemment intéressé jusqu'à présent qu'aux bactéries de l'homme et de nos animaux domestiques, d'où le petit nombre actuellement recensé. Mais il suffit de faire une estimation rapide des bactéries dans un litre d'eau de mer, par exemple, sans faire la fiche de chacune mais en s'appuyant sur une technique qui ne vise qu'à les différencier, pour y compter 20 000 espèces, et un kilogramme de sol devrait en afficher un nombre équivalent. Pas de surprise, donc, si les microbiologistes avancent des totaux de plusieurs millions d'espèces bactériennes, voire plusieurs dizaines ou plusieurs centaines de millions…

Quant aux virus, on touche là à la frontière du monde vivant, puisqu'il s'agit de filaments d'acide nucléique – ADN ou ARN – encapsulés dans une carapace de protéines, qui ne peuvent pas croître, se reproduire ou même « bêtement » fonctionner en dehors d'une cellule hôte qui leur procure ces fonctions. Ils ne participent donc pas à l'écosystème, sinon pour parasiter leurs membres, de sorte qu'on les boude là aussi dans le grand portrait que l'on dresse de la biosphère terrestre. Signalons toutefois au passage que, tout comme pour les bactéries, nous n'avons qu'une faible idée du nombre d'espèces virales possible, les estimations courant de plusieurs millions à plusieurs *centaines de millions*.

Virus et bactéries étant traditionnellement écartés, à tort ou à raison, du grand recensement de la biosphère terrestre, le total des sujets « officiels » de la planète – du protozoaire à la baleine, en passant par les champignons, plantes, invertébrés et vertébrés – franchit tout juste la barre des deux millions d'espèces vivantes, aujourd'hui décrites et cataloguées. Travaillant d'arrache-pied, les chercheurs ajoutent 15 000 à 20 000 nouvelles espèces à cette liste chaque année.

Combien de travail leur reste-t-il à faire pour compléter le grand catalogue de la vie terrestre ? S'ils ne reçoivent pas de renforts et continuent leur catalogage au même rythme, il est à craindre qu'ils en aient sans doute encore pour deux ou trois siècles. En extrapolant à partir des nombres connus pour estimer le total des espèces inconnues, le chercheur Camilo Mora et son équipe, à l'université Dalhousie de Nouvelle-Écosse (Canada), arrivent à un nombre compris entre 7,5 et 10 millions d'espèces. Nous n'en connaîtrions donc qu'un petit quart à l'heure actuelle.

Espèces, genres et familles

La classification des organismes vivants est une affaire délicate : c'est le domaine de la *taxonomie* – donner des noms aux espèces ou « taxons » – et de la *phylogénie* qui cherche à établir leurs relations « parentales » (les schémas d'évolution et de descendance). On peut ainsi se représenter le monde vivant comme un arbre généalogique avec des branches principales se diversifiant au fil du temps en rameaux de plus en plus nombreux.

On reconnaît ainsi à la base de l'arbre plusieurs embranchements majeurs qu'on appelle empires ou règnes. Un type de classification parlera ainsi de trois *empires* : les bactéries, les archées (ou archéobactéries) et les eucaryotes : cellules à noyau qui ont donné tous les êtres multicellulaires. On divise aujourd'hui les eucaryotes en cinq *règnes* que sont les protistes (algues unicellulaires et protozoaires, notamment), les chromistes (algues brunes), les mycètes (moisissures et champignons), les végétaux et les animaux.

Chaque règne se subdivise alors en *embranchements* : ils sont au nombre d'une dizaine pour les animaux, comme les arthropodes, les mollusques ou encore les chordés, dont un sous-embranchement constitue les vertébrés.

Ces embranchements et sous-embranchements se divisent alors en *classes*, que sont par exemple chez les vertébrés les amphibiens, les reptiles, les oiseaux et les mammifères. Les classes se divisent en *ordres*, le foisonnement de ces rameaux devenant de plus en plus important puisque la classe des mammifères compte une trentaine d'ordres, parmi lesquels les rongeurs, les chiroptères (chauves-souris), les carnivores ou encore les primates.

Puis on passe aux *familles* : la classe des primates, par exemple, compte entre autres les lémuriens, diverses familles de singes de l'Ancien et du Nouveau Monde, ou encore les hominidés. Les familles se divisent en *genres*, au nombre de trois chez les hominidés : les gorilles, les chimpanzés et les humains (genre *Homo*). Enfin, les genres se subdivisent en *espèces* : s'il n'en reste qu'une seule chez les humains, *Homo sapiens*, les gorilles comptent deux espèces : le gorille de l'Ouest africain (*Gorilla gorilla*) et celui de l'Est africain (*Gorilla beringei*).

Au final, une espèce est identifiée par deux ou trois mots latins : le nom du genre (qui prend une majuscule), son qualificatif d'espèce, et parfois un troisième terme signifiant sa sous-espèce, souvent pour marquer une population géographique particulière, par exemple *Gorilla gorilla dielhi*, pour le gorille de l'Ouest africain de la rivière Cross, à tête et dents plus petites que ses cousins.

Ce système de classification est en perpétuelle évolution et se complexifie avec des niveaux intermédiaires comme les sous-ordres, les super-familles, les tribus, les sous-sections… De quoi en perdre son latin !

www.frenchpdf.com

Les espèces sont mortelles

Voilà en ce qui concerne le recensement des espèces actuelles – ce cliché instantané de la biosphère terrestre au jour d'aujourd'hui. Bien d'autres espèces ont vécu autrefois puis disparu, parce qu'elles ont muté en espèces nouvelles ou bien quitté la scène sans descendance. Ce renouvellement incessant signifie en fait que les espèces actuelles ne représentent que 0,1 % environ de toutes celles qui ont un jour existé : la planète en aurait vu passer ainsi plusieurs *milliards* au cours de sa longue histoire.

Certaines espèces vivent plus longtemps que d'autres, avant de changer de forme et de nom, ou de périr dans une impasse. L'espèce humaine, *Homo sapiens*, est ainsi apparue sous sa forme actuelle il y a environ 200 000 ans, à partir d'une espèce antérieure de type *Homo erectus*, mais l'intervalle de temps qui nous reste à vivre sous notre forme actuelle est difficile à prévoir.

En se basant sur les intervalles couverts par les espèces fossiles que l'on répertorie dans les sédiments bien datés, la durée de vie moyenne d'une espèce est de 4 à 5 millions d'années environ. Certaines changent plus vite que d'autres, par exemple les mammifères (lignée humaine comprise) dont la durée de vie serait plutôt de l'ordre d'un million d'années. Inversement, les bivalves atteignent une durée de vie moyenne d'environ 10 millions d'années par espèce.

D'autres espèces sont encore plus persistantes, car bien adaptées à leur environnement et ne connaissant pas de péril particulier. C'est le cas du requin-lutin (*Mitsukurina owstoni*) : si l'on compare les individus actuels avec leurs antécédents fossiles, il semblerait ne pas avoir évolué – c'est-à-dire qu'il serait resté la même espèce – depuis 50 millions d'années. On a fait aussi grand cas du cœlacanthe, poisson primitif dont on trouve les restes fossiles dans des sédiments vieux de plus de 400 millions d'années et dont on a retrouvé deux espèces vivantes dans l'océan Indien, toutes deux d'ailleurs menacées d'extinction. Il faut toutefois ne pas confondre espèce particulière et groupe d'espèces, puisque le cœlacanthe est plutôt un nom de groupe (un *ordre*, comme disent les taxonomistes, voir encadré) qui a regroupé de nombreuses familles, genres et donc espèces de cœlacanthes au cours des âges géologiques. Les deux qui survivent aujourd'hui se sont individualisés il y a une soixantaine de millions d'années, ce qui n'est déjà pas si mal. Plusieurs dizaines d'autres espèces de ces « cœlacanthiformes » ont en revanche mordu la poussière ou, devrait-on plutôt dire, mordu la vase.

Que les espèces finissent par disparaître, après avoir engendré ou non au cours de leur existence un ou plusieurs successeurs, est donc une réalité – réalité qui a mis du temps à s'imposer dans notre vision religieuse d'un monde parfait.

Georges Cuvier (1769-1832) fut l'un des premiers savants à s'en persuader, en étudiant la succession et la disparition d'espèces fossiles dans les sédiments du Bassin parisien. Pour expliquer ces disparitions qui surviennent souvent en groupe, notamment lorsque des dépôts lacustres contenant des ossements de mammifères font place brusquement à des sédiments marins truffés de coquillages, Cuvier imagine de violentes catastrophes – inondations et séismes planétaires – qu'il appelle « révolutions du globe ». Après chaque crise, le repeuplement de la Terre s'effectuerait grâce à la migration d'animaux qui s'étaient réfugiés hors de portée du phénomène, ou par volonté divine d'un créateur continuant son œuvre.

Cette notion de catastrophisme – qu'un grand nombre d'espèces puissent mourir à la fois – eut toutefois du mal à s'implanter dans l'esprit des scientifiques. Nombre de géologues, en particulier outre-Manche, s'étaient persuadés que la Terre était régie par de lents processus, progressifs et sans heurts, à l'image de ce qu'ils voyaient dans la vie de tous les jours : la lente érosion des berges d'une rivière ; le dépôt d'un banc de sable, grain par grain, au débouché d'un delta. Ce concept, appelé *uniformitarisme*, qui écartait la notion de catastrophe comme étant trop caricaturale et trop biblique, devait longtemps régner dans les sciences.

Or ce fut justement dans les îles Britanniques, où ce dogme était le mieux installé, que le géologue anglais John Phillips (1800-1874), après avoir recensé toutes les espèces fossiles à sa portée et dressé un calendrier des temps géologiques, se persuada qu'à plusieurs reprises il y avait eu des cassures assez nettes dans la succession des espèces vivantes. Il divisa ainsi l'histoire de la Terre en trois grandes ères : le Paléozoïque (ère des animaux anciens, en grec), le Mésozoïque (ère des animaux intermédiaires) et le Cénozoïque (ère des animaux récents) – termes que les écoliers allaient apprivoiser plus tard sous les noms d'ère primaire, secondaire et tertiaire.

La première cassure, entre les ères Paléozoïque et Mésozoïque, s'avéra la plus spectaculaire : dans la subdivision plus fine des périodes géologiques (les ères étant découpées en périodes), elle marque la frontière entre le Permien (dernière période du Primaire) et le Trias (première période du Secondaire) et deviendra donc connue sous le nom de crise de la fin du Permien, à la frontière Permien/Trias. La seconde grande cassure, entre le Crétacé (dernière période du Secondaire) et le Paléocène (première époque du Tertiaire), deviendra célèbre sous le nom de crise de la fin du Crétacé, à la limite Crétacé/Tertiaire : c'est celle de la fin des dinosaures.

Phillips était en avance sur son temps. Il faut attendre un siècle supplémentaire – 1963 précisément – pour que le paléontologue allemand Otto Schindewolf (1896-1971) remette l'accent sur la crise de la fin du Permien, soulignant son ampleur exceptionnelle et proposant pour l'expliquer une cause tout aussi exceptionnelle, à savoir l'explosion

www.frenchpdf.com

d’une étoile à proximité de la Terre – une supernova – qui aurait inondé la planète et sa biosphère de radiations mortelles.

Une telle agression stellaire sera remise sur le tapis quelques années plus tard pour tenter d’expliquer l’autre grande coupure du monde vivant : la fin des dinosaures. Si elle n’a été validée ni dans un cas, ni dans l’autre, la proposition a au moins eu le mérite de réveiller les géologues et de leur faire prendre conscience qu’il y avait là de grands mystères à résoudre, de grands périls possibles pour la planète Terre, et que les extinctions valaient la peine d’être étudiées.

Quatre ans plus tard, en 1967, le géologue américain Norman Newell (1909-2005) repassa le registre fossile au peigne fin et n’identifia pas moins de cinq périodes charnières dans l’histoire de la Terre, marquées par des chutes conséquentes du nombre d’espèces vivantes : une première à la fin de l’Ordovicien, il y a 445 millions d’années ; une seconde à la fin du Dévonien, il y a 375 millions d’années ; celle de la fin du Permien, il y a 250 millions d’années ; une quatrième à la fin du Trias, il y a 200 millions d’années ; et celle de la fin du Crétacé – qui a vu la disparition des dinosaures – il y a 66 millions d’années.

D’autres analyses statistiques encore plus poussées des fossiles, notamment celles du paléontologue américain Jack Sepkoski (1948-1999), tenteront d’allonger la liste, les petits sursauts du nombre d’espèces au cours du temps faisant même croire à une vingtaine de crises du monde vivant. La plupart ne résisteront pas à des études approfondies, soit parce qu’elles ne se détachent pas suffisamment du « bruit de fond » des extinctions ordinaires qui rythment le cours de l’évolution, soit parce qu’elles n’affectent qu’une région du monde – une crise régionale – plutôt que la Terre entière.

Au final ne ressortent véritablement que les cinq crises que nous avons énumérées, qui prendront le nom de « grandes extinctions de masse » (ou « en masse ») du monde vivant lorsque les trois quarts des espèces disparaissent, voire 95 % dans le cas de la crise du Permien[3].

Cette prise de conscience des crises passées de la biosphère, qui ne s’est véritablement répandue dans la profession qu’à partir des années 1980, s’est accompagnée à peu près à la même époque de celle que les méfaits de l’espèce humaine, à travers la surexploitation des animaux (surchasse et surpêche), la déforestation et la destruction de l’habitat, la pollution de l’environnement et le réchauffement climatique, pourraient décimer la biosphère au point que la liste des victimes finirait par rejoindre l’ampleur des grandes extinctions du passé. On en est venu ainsi à parler de la crise actuelle du monde vivant comme annonçant la sixième grande extinction en masse de l’histoire de la Terre.

Comme nous le verrons au fil de ces pages, nous sommes encore loin des chiffres qui permettraient de parler aujourd’hui de grande extinction en masse, puisque la liste des victimes se limite dans le cas actuel à 2 ou 3 % des espèces répertoriées, plutôt que 75 % ou plus pour les grandes crises du passé. Mais le processus actuel s’emballe, à l’image du réchauffement climatique qui va aggraver le problème, et les prévisions sont inquiétantes. Notre grande chance, c’est de nous en rendre compte et de disposer d’un certain nombre de solutions pour endiguer le phénomène.

Notre seconde chance, c’est d’avoir accès à l’histoire de la Terre et de pouvoir étudier les grandes extinctions passées pour voir comment elles se sont déroulées, comment des cercles vicieux peuvent se mettre en place qui amplifient la destruction de l’écosystème, quelles sont les espèces les plus touchées, et comment la biosphère récupère au bout du compte.

Ce qui ressort d’un premier survol de la question, c’est que toutes les grandes extinctions semblent avoir eu des déclencheurs différents et présentent dans le détail des déroulements très variés.

Cinq grandes extinctions

Il y eut certainement de grandes crises du monde vivant bien avant la première que nous allons évoquer, mais à une époque où coquilles et ossements n’avaient pas encore été inventés par l’évolution, d’où une préservation très aléatoire des fossiles. Sans ces témoignages solides, qui permettent de recenser les espèces, il nous est impossible d’établir des statistiques et de suivre dans le détail ces premières vagues d’extinctions.

www.frenchpdf.com

Ères/Périodes		Limites (millions d'années)	Principales victimes
Q	Pléistocène	2,6	
Cénozoïque (Tertiaire)	Pliocène	5,3	
	Miocène	23	
	Oligocène	34	
	Éocène	56	
	Paléocène	66 (K/T)	dinosaures, reptiles, plantes, plancton, coraux, poissons, invertébrés
Mésozoïque (Secondaire)	Crétacé	145	
	Jurassique	201 (Tr/J)	reptiles, invertébrés marins
	Trias	252 (P/Tr)	flore, reptiles, plancton, coraux, poissons, etc.
Paléozoïque (Primaire)	Permien	299	
	Carbonifère	359 (D/C)	
	Dévonien	372 (F/F) ; 419	flore, coraux, plancton, invertébrés, poissons
	Silurien	444	coraux, trilobites, brachiopodes
	Ordovicien	485	
	Cambrien	541	

Les cinq grandes extinctions du monde vivant et leurs principales victimes

(D'après FRANKEL C., *La Mort des dinosaures. L'hypothèse cosmique*, Masson, 1996).



Le Dinogorgon, reptile archaïque de la taille d'un ours, fut l'une des innombrables victimes de la grande extinction de la fin du Permien, il y a 251 millions d'années. On en trouve de nombreux restes fossiles en Afrique du Sud. (© Jonathan Blair /National Geographic Creative.)

Tout au plus sait-on que d'importantes crises climatiques sont survenues il y a 750 à 650 millions d'années environ, durant lesquelles la quasi-totalité de la planète s'est englacée, surface océanique comprise, et que c'est au sortir de ces temps frigorifiques que la vie a explosé en complexité et s'est diversifiée – la célèbre « explosion du Cambrien » – ce qui, d'ailleurs, n'est sans doute pas une coïncidence.

Crise de la fin de l'Ordovicien (445 m.a.[4])

Avec l'apparition des coquilles et autres armatures solides des nouvelles espèces qui voient le jour, un registre détaillé de l'évolution se met en place, et c'est dans ce contexte que les paléontologues identifient la première grande extinction en masse de la biosphère : celle de la fin de l'Ordovicien, il y a 445 millions d'années environ.

La vie est alors largement cantonnée aux océans et il n'y a que quelques rares mousses et plantes primitives sur les

www.frenchpdf.com

rivages marins et les berges des rivières. La plupart des continents sont rassemblés autour du pôle Sud, avec uniquement l'Amérique du Nord, la Sibérie et la Baltique qui chevauchent l'équateur. Sans doute est-ce cette disposition antarctique des principaux continents qui a favorisé leur invasion par les glaces : toujours est-il qu'un net refroidissement a secoué la planète. Et comme l'eau des glaciers était soutirée aux océans, s'y ajouta une baisse du niveau marin : les riches mers peu profondes qui s'enfonçaient au cœur des continents se sont retirées. Pour les populations de mollusques, coraux et trilobites – les familles dominantes de l'époque – ce cumul d'une perte importante de leur surface habitable et d'un refroidissement brutal eut raison de près de 85 % des espèces, ce qui fait de la fin de l'Ordovicien la seconde plus grande extinction de masse de l'histoire de la planète, après celle de la fin du Permien.

Nul ne sait pourquoi cette grande glaciation s'est déclenchée, ni pourquoi elle eut un tel effet sur le monde vivant. Il y a là un profond mystère, et nous ne pouvons pas pour l'instant en tirer de véritable leçon, applicable par exemple à la situation actuelle. C'est d'autant plus énigmatique que la succession de périodes glaciaires que nous avons connues au cours des deux derniers millions d'années de notre histoire n'a pas du tout ébranlé la biosphère, si ce n'est la toute dernière glaciation, mais il fallut pour cela l'influence néfaste de l'homme, comme nous le verrons plus tard.

Crise de la fin du Dévonien (372 m.a.)

Il y a 372 millions d'années débute la seconde des cinq grandes extinctions, qui s'articule en plusieurs pulsions ventilées sur trois millions d'années au moins. Au total, ce sont 75 % des espèces qui disparaissent, principalement des espèces marines, alors que l'écosystème terrestre, qui compte désormais des forêts d'arbres primitifs et nombre d'insectes, semble relativement peu touché. En mer, le déclin des récifs coralliens est particulièrement spectaculaire et s'accompagne d'extinctions chez les éponges, les trilobites et les poissons primitifs.

Là aussi, les spécialistes se perdent en conjectures pour expliquer la crise. Elle est longue et multiple, avec des vagues d'extinctions apparemment liées à des troubles dans l'environnement marin : chutes à répétition du taux d'oxygène, avec étouffement des faunes qui vivent sur le fond, et fluctuations du niveau des mers. Il n'y a pas de grandes glaciations, mais quelques traces d'impact de petits astéroïdes ou comètes – sans doute insuffisants pour bouleverser la planète – et pas de crise volcanique particulière. On en vient à échafauder des scénarios insolites, comme incriminer l'essor des forêts : les arbres, avec l'aide des insectes, auraient décomposé pour la première fois les roches en un sol épais, lessivé par les pluies et déchargé par les cours d'eau sur le plateau continental, au point de troubler les eaux côtières et d'occire le corail. En tout cas, voilà un autre mystère à résoudre pour les étudiants des sciences de la Terre.

La crise de la fin du Permien (252 m.a.)

Troisième grande crise du monde vivant et de loin la plus sévère, celle de la fin du Permien, il y a 252 millions d'années, impressionne avec 56 % des genres exterminés, ce que les extrapolations traduisent par environ 95 % des espèces passées de vie à trépas. Elle n'est pas uniquement marine, puisque les trois quarts des vertébrés mordent la poussière, tous milieux confondus. Même les insectes connaissent une coupe sévère dans leurs effectifs. Tout cela s'est sans doute passé en moins de 100 000 ans, tellement la disparition des fossiles se concentre en de très minces strates de sédiments.

Quelque chose de très grave s'est passé à cette époque charnière, et s'il n'y a pas trace convaincante d'impact d'astéroïde ou de comète sur la planète, des éruptions volcaniques exceptionnelles se sont déroulées en Sibérie à l'époque, comme il n'en advient qu'une fois seulement toutes les quelques dizaines de millions d'années. Si les autres éruptions gigantesques du genre, appelées *trapps* 5, ne semblent pas avoir fait broncher la biosphère terrestre – on verra qu'elles sont innocentées par exemple dans le massacre des dinosaures –, celles de Sibérie sont particulièrement étranges : elles sont très riches en cendres pulvérisées, ce qui n'est pas typique des trapps, connus surtout pour leurs volumineuses mais paisibles coulées de lave. Les géologues émettent l'hypothèse que le magma est entré en contact avec des gisements de charbon et de méthane en atteignant la surface, au fond d'un chapelet de lacs ou d'une mer peu profonde, vaporisant et propulsant une quantité exceptionnelle de carbone dans l'atmosphère. Un effet de serre extrêmement rapide et violent s'en serait suivi, décimant la biosphère.

Ce serait donc la coïncidence entre un événement volcanique de grande ampleur et la nature de la roche locale affectée, riche en hydrocarbures, qui aurait créé le problème, un effet amplificateur que l'on pourrait appeler « effet de cible ». En tout cas, l'hypothétique dissociation de glaces de méthane, soit directement sur place au contact du magma, soit ailleurs sur Terre sous le coup du réchauffement climatique que le volcanisme aurait initié, montre à quel point un début de perturbation de l'environnement peut servir de détonateur à un phénomène encore plus néfaste. C'est le type de cercle vicieux ou effet « boule de neige » – « boule de chaleur » en l'occurrence – qui nous pend au nez aujourd'hui si nous ne maîtrisons pas l'envolée de notre propre réchauffement climatique, et c'est sans doute là l'une des plus importantes leçons que nous devons tirer de la crise du Permien. Encore faudrait-il confirmer ce scénario vieux de 250 millions d'années, ce qui ne manquera pas d'occuper les prochaines générations de chercheurs.

www.frenchpdf.com

Crise de la fin du Trias (200 m.a.)

La biosphère terrestre s'est à peine remise de la plus grande catastrophe de son histoire lorsque frappe un quatrième coup : la crise de la fin du Trias, il y a 200 millions d'années. À vrai dire, nombre de géologues se demandent aujourd'hui si elle mérite de figurer au même rang que les autres, et même si on annonce 75 % d'espèces occises, les nombres masquent peut-être le fait que la biosphère a connu moins de créations de nouvelles espèces à l'époque pour remplacer celles qui venaient naturellement à dépérir, biaisant les statistiques et donnant l'apparence d'une catastrophe, alors qu'il s'agirait plutôt d'un marasme de l'écosystème.

Du reste, aucun phénomène exceptionnel ne se déclare à l'époque qui pourrait justifier une crise catastrophique du monde vivant : ni impact, ni glaciation, ni réchauffement, si ce n'est un sursaut du volcanisme et de la tectonique des plaques qui commencent à séparer l'Amérique du Nord de l'Afrique, mais dont le synchronisme avec les extinctions et surtout la causalité sont loin d'être prouvés.

En résumé, ces quatre premières crises du monde vivant mettent en cause des mécanismes différents : grandes glaciations pour la fin de l'Ordovicien ; dérèglement possible de la sédimentation côtière et étouffement du corail à la fin du Dévonien ; interaction néfaste d'éruptions volcaniques et de poches d'hydrocarbures à la fin du Permien ; balbutiements de l'évolution avec déséquilibre des extinctions et des créations d'espèces à la fin du Trias.

Il reste du travail à abattre et certainement de passionnantes découvertes à faire dans ces quatre champs d'études. Mais avant de nous pencher sur les prémisses de la sixième grande extinction que nous vivons peut-être aujourd'hui, il nous reste à voir la cinquième, qui est de loin la plus étudiée et nous sert de modèle pour comprendre comment la biosphère terrestre peut s'effondrer de façon catastrophique en un temps très bref : la crise de la fin du Crétacé, qui a vu entre autres la disparition des dinosaures, il y a 66 millions d'années. Aucune autre crise n'a autant marqué les esprits, parce qu'elle est si proche de nous dans le temps, parce que ses victimes sont si populaires, et parce qu'elle a présidé à un virage majeur dans l'histoire de l'évolution, libérant la scène pour l'expansion des mammifères qui conduira, au final, à l'essor du genre humain.

1.

Muséum d'histoire naturelle de New York, communiqué de presse, 20 avril 1998, ma traduction.

2.

Si mule (hybride femelle) ou mulet (hybride mâle) peuvent naître de l'union de l'âne et du cheval, ils sont en effet stériles.

3.

Dans la pratique, ce ne sont pas les espèces que comptent les recenseurs de fossiles, mais les genres, plus faciles à comptabiliser. À partir du nombre de genres, on extrapole le nombre d'espèces qui auraient disparu.

4.

m.a. = millions d'années avant aujourd'hui.

5.

Le mot *trapp* signifie « escalier » en suédois, car l'érosion débite souvent ces grands plateaux de lave en marches et terrasses, donnant l'impression d'un gigantesque escalier.

www.frenchpdf.com

2

La fin des dinosaures

Les dinosaures sont morts et c'est tant mieux. S'ils n'avaient pas disparu de la surface de la Terre, il est probable que les discrets mammifères ne seraient jamais sortis de leur ombre et que l'espèce humaine, leur plus beau fleuron, n'aurait même pas vu le jour.

Ce discours a du succès, parce qu'il est déterministe : l'évolution doit avoir un sens et tend vers l'accomplissement d'une destinée dont l'homme est la vedette annoncée. Dans cette logique, il ne pouvait en être autrement : les dinosaures étaient condamnés dès le départ à disparaître pour nous céder la place. Pour se donner bonne conscience, on a forcé le trait en les présentant comme un cul-de-sac de l'évolution, pataudes et inadaptés au changement, au point que traiter une personne peu flexible et sans avenir de « dinosaure » est entré dans le langage courant.

Mais on peut douter de ce joli scénario. Les chercheurs qui ratissent le terrain à la recherche de fossiles, afin de reconstituer l'histoire de la vie sur Terre, ont dressé pour les dinosaures un bilan qui force le respect. Leurs ossements et leurs traces de pas couvrent une durée de plus de 150 millions d'années, et ils ont compté plusieurs milliers d'espèces différentes qui se sont remplacées et relayées au fil de l'évolution, sous toutes les latitudes et sur tous les continents1.

Un tel succès planétaire sur une aussi longue durée démontre que les dinosaures ont très bien su s'adapter, le climat et l'environnement ayant maintes fois changé en 150 millions d'années. Qu'ils aient fini par disparaître devrait au contraire surprendre, et lorsque les hommes de science se sont penchés de plus près sur cette disparition, nombre d'entre eux ont laissé au vestiaire le mythe d'une dégénérescence programmée et se sont persuadés au contraire que les dinosaures avaient été abattus en pleine gloire par un mystérieux fléau.

Le timing de cette disparition correspond à une transition dans la succession des fossiles, apparente dans les sédiments, qui marque le passage d'une faune où les dinosaures et grands reptiles dominent, à une autre où l'on ne trouve plus de dinosaures, mais où l'on constate l'essor des mammifères. Cette transition est tellement marquée qu'on l'a utilisée dès le XIX e siècle, comme on l'a vu, pour définir la fin d'un grand tome de l'histoire de la vie sur Terre – l'ère secondaire ou « âge des reptiles » – et le début du tome suivant : l'ère tertiaire ou « âge des mammifères »2.

Une crise mondiale

Cette transition ne concerne pas seulement les animaux de la terre ferme. Dans le monde marin on observe aussi un changement notable de la faune au même moment, avec un effondrement du plancton, la disparition de nombreux poissons et mollusques, et celle de tous les grands reptiles marins – plésiosaures et mosasaures en tête.

Ce synchronisme des extinctions n'a pas été perçu tout de suite dans sa globalité. Les spécialistes des dinosaures n'étaient guère au courant des tribulations des reptiles marins, des courbes de population des bivalves, ni des populations changeantes de plantes à fleurs à la fin du Crétacé, tout comme aujourd'hui l'amateur d'oiseaux n'est pas nécessairement au courant du déclin des pachydermes ou de l'effondrement du stock des morues.

Les amateurs de dinosaures ont donc souvent cherché des explications spécifiques à la disparition de leurs animaux chéris, comme un virus mortel, l'ingestion de fleurs empoisonnées, un état de stress interférant avec leur reproduction, ou le massacre de leurs œufs par de petits mammifères devenus de plus en plus malins. De leur côté, les spécialistes d'ammonites et de bivalves ont commencé à expliquer le déclin de leurs espèces en invoquant une baisse du niveau marin, réduisant l'espace qu'elles pouvaient occuper sur le plateau continental. Mais à mesure que les spécialistes se sont rendu compte que leurs protégés n'étaient pas les seuls touchés et que la crise affectait tout le monde vivant, ils se sont mis en quête de trouver une explication globale. Ont alors émergé deux courants d'opinion, reflétant deux lectures et deux approches très différentes du problème.

Le premier, prenant racine dans la philosophie dominante chez les géologues depuis près de deux siècles, voudrait que les changements soient nécessairement lents et progressifs à la surface de la Terre. Un changement climatique étalé sur des centaines de milliers d'années, par exemple, suffirait à expliquer un renouvellement progressif de la biosphère. Les différentes espèces de dinosaures auraient disparu l'une après l'autre sur un long intervalle de temps, tout comme les reptiles marins, ammonites, coraux, et autres victimes de la grande transition. Nombre de spécialistes de dinosaures y trouvaient leur compte, car le recensement des espèces fossiles semblait leur indiquer un déclin de la diversité étalé sur plusieurs millions d'années3.

www.frenchpdf.com

Le second courant d'opinion voyait dans ces disparitions progressives une illusion due à la rareté des sites fossilifères, éparpillés dans des régions différentes du globe et dont les écosystèmes étaient difficilement comparables. Selon eux, l'étude d'un plus grand nombre de sites finirait par remplir le tableau et montrer que la diversité et le nombre d'espèces restaient élevés jusqu'à une crise brève et brutale.

Un scénario catastrophe paraissait d'autant plus probable à ses partisans que l'extrême portée des extinctions, affectant toutes les formes de vie sur terre et dans les mers, appelait un phénomène hors du commun, d'autant qu'un tel chamboulement n'était survenu que quatre ou cinq fois au cours des derniers 500 millions d'années, à en croire le registre fossile. De leur avis, glaciations, grandes éruptions volcaniques, fluctuations du niveau des mers – toutes invoquées par le camp précédent pour expliquer une crise progressive sur des millions d'années – survenaient bien trop souvent dans l'histoire du globe, sans faire de dégâts aussi notables, pour être les principaux suspects. À crise exceptionnelle, cause exceptionnelle, mais restait à trouver laquelle.

De la difficulté de devenir fossile

On décrypte l'histoire de la vie sur Terre, et dans le cas qui nous intéresse celle de la fin du Crétacé, en examinant les couches de sédiments qui accumulent les fossiles au cours du temps.

Mais devenir fossile n'est pas à la portée de n'importe qui. Il faut que le cadavre, avant d'être déchiqueté par des charognards, soit rapidement enseveli dans des boues ou dans du sable, l'oxygène et les acides n'y ayant pas accès, de sorte qu'il échappe à la dissolution. Et pour que le fossile raconte son histoire, il faut qu'il réapparaisse à la surface aujourd'hui, dégagé par l'érosion, et qu'un chercheur le trouve.

Cela fait beaucoup de conditions à remplir, et bien rares sont les individus – animaux ou végétaux – qui ont la chance de devenir fossiles, et le privilège d'être découverts.

En particulier, certains endroits sont plus fossilifères que d'autres : ceux où une rivière, un marais ou une mer calme recouvre le cadavre de sédiments. Prenez l'exemple des dinosaures en France à la fin du Crétacé. On ne trouve pas de fossile de dinosaure en Bretagne, et pour cause : tout comme aujourd'hui, c'était un relief au-dessus des eaux et s'il est certain que ses forêts devaient regorger de grands reptiles, il n'y avait pas de bassin pour leur servir de cimetière. En revanche, le Languedoc et la Provence étaient occupés à l'époque par un chapelet de lacs et de marais, sur les berges desquels sont venus nicher les dinosaures : on y collecte ainsi un bon nombre d'ossements et d'œufs fossilisés, notamment à Mèze dans l'Hérault et au pied de la montagne Sainte-Victoire, près d'Aix-en-Provence.

Le monde marin est bien sûr encore mieux loti, puisque la sédimentation y est permanente, certaines couches étant presque exclusivement composées de coquillages et tests de plancton. C'est le cas de la craie qui a donné son nom à la période Crétacé, et qui n'est autre qu'un amoncellement compact de minuscules particules calcaires de plancton.

Un deuxième point mérite d'être noté. Les espèces aux individus nombreux ont plus de chances de laisser une trace dans le registre fossile que les animaux dont les effectifs sont clairsemés, comme le furent les gros dinosaures.

Cette rareté peut mener à de fausses interprétations. Sur un site fossilifère, en escaladant une pile de sédiments, on peut ne découvrir un os de dinosaure que tous les quelques mètres seulement, mètres qui représentent plusieurs dizaines de milliers d'années de sédimentation. Imaginez qu'une catastrophe brutale extermine tous les dinosaures de la Terre à un niveau donné. Par chance, on peut trouver le dernier fossile d'une espèce de dinosaure juste sous ce niveau. Mais on peut tout aussi bien le trouver plusieurs mètres en dessous : cela ne voudra pas nécessairement dire que l'espèce a disparu des dizaines de milliers d'années avant la catastrophe, mais seulement que par malchance ou manque de travail, on n'a pas trouvé l'un de ses fossiles dans les derniers mètres. En ressort l'impression que les dinosaures ont disparu progressivement, alors qu'en réalité ils pourraient tous avoir été massacrés au même moment.

Afin de juger de la brièveté ou non du bouleversement des espèces vivantes à la fin du Crétacé, il est donc judicieux de s'intéresser aux petites formes de vie dont les individus pullulent et qui laissent des fossiles en très grand nombre, ce qui permet une vision « à haute résolution » du déroulement des événements. Sur la terre ferme, les spores et le pollen des plantes sont d'excellents indicateurs. Dans le monde marin, le foisonnement du plancton est tout aussi révélateur : on peut recenser leurs nombreuses micro-espèces et déterminer exactement où et quand elles disparaissent.

Une mystérieuse couche d'argile

Le meilleur moyen d'avancer sur la question, c'était de trouver des couches sédimentaires suffisamment complètes et précises pour disséquer le cours des événements à la fin du Crétacé. Bien qu'ils ne contiennent pas d'ossements de dinosaures, les sédiments marins permettent ce genre d'analyse à haute résolution, grâce à leur plancton : les microfossiles de ces petits organismes sont nombreux et comme leurs espèces évoluent très vite, la succession de leurs différentes formes constitue une sorte de « calendrier » géologique.

www.frenchpdf.com

L'Europe possède de très beaux sites marins datant de la fin du Crétacé qui se retrouvent aujourd'hui élevés au-dessus du niveau de la mer et donc faciles d'accès : c'est le cas d'un vallon calcaire dans les Apennins d'Italie, près du village médiéval de Gubbio, et d'une falaise de craie sur la mer Baltique, à Stevns Klint au Danemark.

En passant de tels sites au peigne fin dès les années 1970, les paléontologues ont identifié une mince couche d'argile, de quelques millimètres à quelques centimètres seulement d'épaisseur, qui marque la fin abrupte de nombreuses espèces de plancton. Au-dessus de cette limite, seules une ou deux espèces survivent, avec des individus peu nombreux et très petits. Cela concordait bien avec l'idée d'une catastrophe brutale ayant affecté le monde marin. Au Danemark, on trouve même une grande concentration de débris de poissons dans cette couche « frontière » – cimetière qui a valu à cette argile le nom de *fish clay* : « argile à poissons ».

À l'intérieur des terres, dans les sédiments continentaux, les chercheurs finirent par repérer la même couche d'argile, en Amérique du Nord notamment, qui brise net la richesse et la diversité de nombreuses espèces de plantes, puisque leurs spores et pollens disparaissent brutalement au-dessus de l'argile.

En mer comme sur terre se dessine ainsi une couche repère du moment de la crise, répandue tout autour de la Terre. Aux quelques sites connus dans les années 1970, les chercheurs n'ont cessé d'agrandir la liste : plus de 60 sites au milieu des années 1980, et plus de 350 sites en 2015, recensés dans toutes les mers et sur tous les continents.

Cette fine couche d'argile a pris le nom, devenu aujourd'hui célèbre, de couche « KT » puisqu'elle marque la transition entre le Crétacé (symbole K), dernière période de l'ère secondaire qui est l'ère des dinosaures, et le Tertiaire (symbole T) qui est l'ère de leurs remplaçants : les mammifères[4].

Comme cette fine couche de sédiments marque l'emplacement et donc le « moment » de la crise, les géologues s'y sont intéressés de très près. C'est une argile, c'est-à-dire un ramassis de fines particules minérales, inorganiques, à la différence d'un calcaire qui est formé de microfossiles découlant d'une riche vie marine. Cette argile KT indique donc la cessation de l'activité biologique pendant un certain laps de temps, avant qu'au-dessus ne se dépose un nouveau calcaire contenant quelques espèces de plancton, marquant une timide reprise du monde vivant.

Combien de temps dura cette crise ?

En haute mer, si on interrompt la pluie de microfossiles qui se déposent en temps normal sur le fond et que seules s'accumulent de fines particules minérales apportées par vents et courants, les géologues estiment qu'une couche de boue épaisse d'un centimètre, comme l'argile KT, se forme en 1 000 à 10 000 ans. Mais comme cette argile est exceptionnelle, les taux habituels de sédimentation sont-ils applicables ? Peut-être le centimètre d'argile s'est-il déposé en un temps bien plus bref ? Peut-être témoigne-t-il même du mécanisme précis de la catastrophe ? D'une manière ou d'une autre, calculer son temps de formation serait forcément instructif. Restait à trouver la technique pour le faire.

C'est alors qu'entre en scène Walter Alvarez, professeur de géologie à l'université de Berkeley en Californie. Le chercheur a travaillé au cours des années 1970 sur le site de Gubbio, en Italie, dans une étude visant à peaufiner une échelle des temps géologiques. Ses collègues italiens lui ont montré au passage la mystérieuse couche KT. L'Américain est intrigué : conscient que la fine strate d'argile ne marque pas seulement une crise régionale du plancton, mais qu'elle est contemporaine de la fin des dinosaures partout sur Terre, Walter Alvarez flaire là le genre de problème à résoudre qui ne se présente qu'une fois dans la vie d'un géologue. Il décide d'entraîner son père Luis dans l'aventure, une recrue de choix puisque Luis Alvarez est prix Nobel de physique et adore les mystères : il a monté une expédition en Égypte pour sonder par rayons cosmiques la grande pyramide de Khephren, à la recherche de chambres cachées, et il est en quête d'un nouveau défi.

Comme Luis Alvarez est en poste lui aussi à Berkeley, père et fils se voient souvent pour débattre du problème de la couche KT et chercher des solutions, aux frontières fécondes de la physique et de la géologie. Ils convainquent Frank Asaro et Helen Michel, deux pointures en géochimie, de se joindre à eux pour conduire les délicates expériences qu'ils ont en tête.

Il s'agit de mesurer l'intervalle de temps que représente l'argile KT. Luis Alvarez propose d'utiliser pour cela le « sablier » que constitue le saupoudrage permanent de micrométéorites qui tombent à la surface du globe.

Sur son orbite, la Terre croise en effet en permanence des poussières d'astéroïdes et de comètes, qui pénètrent son atmosphère (les plus grosses sont des étoiles filantes) et se déposent dans les sédiments. On présume que cette pluie de micrométéorites est constante – taux que l'on peut mesurer en laissant des réceptacles dans la nature, à la façon des pluviomètres des stations météo. Ainsi sait-on qu'il en pleut environ 30 000 tonnes par an sur toute la Terre : laissez ce livre ouvert à cette page et il y a fort à parier qu'il s'y posera une micrométéorite, plus petite qu'une tête d'épingle, avant la fin de la journée.

Luis Alvarez postule ainsi que plus une couche de sédiments possède de micrométéorites, plus elle a mis du temps à se former – temps nécessaire pour les recueillir. En recensant les particules de la couche KT, on devrait donc pouvoir estimer grossièrement son temps de formation.

www.frenchpdf.com

Désagréger des échantillons d'argile pour en isoler grain par grain toutes les micrométéorites et les compter serait un travail de folie, mais l'équipe de Berkeley a pensé à un substitut bien plus pratique pour les détecter : l'iridium. Cet atome rare, de la famille du platine, est pratiquement absent de la surface terrestre, car il a été entraîné lors de la formation de la Terre dans les couches profondes du globe. En revanche, on en trouve de petites quantités dans les astéroïdes et les comètes, et donc dans les météorites. Il suffit donc de mesurer la quantité d'iridium dans la couche KT pour en déduire celle des micrométéorites qui l'ont apporté. Et cela est possible par une méthode rusée, car on peut rendre l'iridium radioactif en bombardant l'argile de neutrons : l'iridium signale sa présence en émettant un rayon gamma d'une longueur d'onde caractéristique. Un compteur se charge de les recenser automatiquement.

La méthode est infaillible et heureusement, car la proportion d'iridium dans une météorite est infime : de l'ordre de 0,0001 %, ce qui correspond à 1 000 ppb (*parts per billion*) où l'unité n'est plus le « pour-cent » mais le « pour-milliard ». Et comme les micrométéorites sont diluées dans le reste de l'argile, la concentration mesurée dans l'échantillon devrait tomber à une fraction de ppb, c'est-à-dire à quelques milliardièmes de pour-cent seulement.

C'est donc une affaire de haute précision. L'expert de Berkeley en la matière est Frank Asaro. En France, ce sera plus tard le géochimiste Robert Rocchia, du laboratoire CNRS/CEA de Gif-sur-Yvette, qui analysera de son côté des échantillons d'argile KT de la même façon et avec autant de succès. Car le succès est au rendez-vous, mais sous la forme d'une surprise de taille.

L'hypothèse cosmique

Lorsque les Alvarez donnent à Frank Asaro leurs échantillons à analyser, ils doivent attendre le verdict plusieurs mois, car il y a une longue file d'attente pour utiliser les instruments de mesure. Et quand ils reçoivent enfin les résultats, en juin 1978, ceux-ci sont déconcertants.

Si l'argile s'était déposée en un temps très bref, de l'ordre du mois ou de l'année suite à un événement catastrophique, l'échantillon d'un centimètre cube aurait dû contenir si peu d'iridium – pas le temps d'amasser des micrométéorites – que l'élément aurait été quasiment indétectable. Si la couche KT s'était plutôt formée en 1 000 à 10 000 ans – en se basant sur un taux de sédimentation normal d'un centimètre d'argile en haute mer – alors le compteur aurait dû détecter de 0,01 à 0,1 ppb d'iridium. Or Frank Asaro est très gêné de rapporter un chiffre absurde : plus de 10 ppb, soit 100 à 1 000 fois plus que ce qui semblait raisonnable. Traduit en termes de « sablier cosmique », cela voudrait dire que le centimètre d'argile aurait mis *un million d'années* à se constituer sur le fond marin, un million d'années durant lesquelles vents et courants se seraient pratiquement arrêtés, coupant l'apport de flocons d'argile en haute mer, et toute vie aurait également cessé, puisque l'argile ne contient pas de plancton.

Une aussi longue durée était irréaliste et laissa Luis et Walter Alvarez perplexes. Force était de reconnaître qu'il y avait une faille dans le raisonnement, et que leur beau concept de sablier cosmique ne fonctionnait pas. En tout état de cause, il y avait un singulier excès d'iridium dans l'argile, et c'était un nouveau mystère qu'il fallait percer.

Déjà, cet excès d'iridium n'était pas un phénomène local, restreint aux sédiments italiens de Gubbio, puisque l'équipe de Berkeley trouva une concentration similaire (et même plus élevée) du métal rare à Stevns Klint au Danemark. Et lorsque les chercheurs mettent la main sur un troisième échantillon d'argile prélevé en milieu continental, au Nouveau-Mexique, l'anomalie est toujours là, ce qui prouve qu'elle n'est pas le fruit d'un mystérieux phénomène marin, mais qu'elle est mondiale et que l'iridium est littéralement tombé du ciel.

Tombé du ciel… Avec le recul, on pourrait penser que l'hypothèse d'un gros astéroïde s'écrasant sur Terre et dispersant son iridium tout autour du globe se serait immédiatement imposée aux Alvarez.

Ce ne fut pas le cas, et cela prouve à quel point l'idée d'impacts cosmiques sur Terre était totalement incongrue à la fin des années 1970, sauf parmi un cercle très restreint de planétologues rompus à l'étude des cratères de la Lune et de quelques rares cratères d'impact sur Terre, épargnés par l'érosion. J'étais moi-même étudiant en géologie aux États-Unis à l'époque, et si j'animais bien un atelier sur les impacts lunaires pour les étudiants de première année, j'étais à mille lieues de m'intéresser aux impacts sur Terre : ce sujet me semblait sans intérêt – et même du vandalisme car il chamboulait les strates géologiques – alors que l'élégante théorie de la tectonique des plaques, porteuse d'ordre et d'harmonie, était en plein essor et accaparait toute notre attention. Pour la petite histoire, j'étudiais au même moment en astrophysique un autre sujet à la mode : les *supernovae*, explosions d'étoiles en fin de vie qui étaient devenues la coqueluche des astronomes.

Or c'est justement à une supernova que pensent en premier lieu Luis et Walter Alvarez pour expliquer l'anomalie d'iridium dans la couche KT. Une étoile explosant dans la banlieue de la Terre l'arroserait d'éléments lourds créés par fusion nucléaire lors de la déflagration – entre autres de l'iridium – et ces rayons cosmiques à haute énergie auraient pu mettre à mal la biosphère, comme l'avait postulé quelques années auparavant, mais sans preuves, le spécialiste canadien des dinosaures Dale Russell[5].

Les Alvarez mettent donc sur pied une seconde expérience pour voir si l'iridium de la couche KT provenait de l'explosion d'une supernova. L'expérience consistait à rechercher dans l'argile du plutonium, un autre atome rarissime à la surface de la Terre, et notamment l'une de ses formes radioactives : le plutonium 244, dont le

www.frenchpdf.com

minuscule stock que possédait notre planète à son origine se serait depuis longtemps désintégré. Si on en trouvait dans la couche KT, c'est qu'il provenait nécessairement d'une « usine » récente et extérieure à la Terre, c'est-à-dire d'une supernova.

C'est Helen Michel, spécialiste du plutonium, qui se charge de l'analyse. Or, après une fausse alerte (et quelques battements de cœur !) lors d'une première mesure, le résultat est décevant : pas de plutonium, et donc pas trace de supernova.

Il fallut plusieurs mois à l'équipe de Berkeley pour digérer cet échec et, à court d'idées, se rendre à l'évidence qu'un impact d'astéroïde pouvait expliquer leurs observations. Mais il est facile de parler d'évidence *a posteriori*. À l'époque non seulement les impacts n'étaient pas pris aux sérieux par la plupart des géologues, comme on l'a souligné, mais il ne leur venait même pas à l'esprit qu'une collision quelque part sur Terre, aussi violente fût-elle, pût exterminer la majorité des espèces vivantes sur toute la surface du globe.

C'est en pensant aux grandes éruptions volcaniques du passé que Luis Alvarez trouva son inspiration et comprit le mécanisme mortel d'un impact d'astéroïde. Il avait lu que les grandes éruptions en Indonésie, du Tambora en 1815 et du Krakatau en 1883, avaient mené à un léger refroidissement du climat mondial sur plus d'un an, dû aux fines particules de poussière et de cristaux de soufre éjectées dans la haute atmosphère. À une échelle incomparablement plus vaste et plus violente, l'impact d'un gros astéroïde aurait pu soulever un tel voile de poussières que la Terre se serait trouvée plongée dans une froide et interminable nuit, des semaines ou des mois durant, au point où l'arrêt de la photosynthèse aurait brisé la chaîne alimentaire, dans les océans comme sur la terre ferme, menant à l'extinction en cascade des espèces vivantes.

Armés d'un mécanisme crédible pour expliquer les effets dévastateurs de leur astéroïde présumé, Walter et Luis Alvarez, avec Frank Asaro et Helen Michel comme coauteurs, font finalement le grand saut et publient leurs analyses et l'hypothèse d'un impact cosmique dans la revue américaine *Science*, en juin 1980.

Cet article résonne comme un coup de canon à travers la communauté scientifique. Il défie l'opinion majoritaire, devenue un véritable dogme, selon laquelle les processus géologiques sur Terre sont nécessairement graduels, les catastrophes appartiennent aux récits bibliques, et les dinosaures se sont éteints de leur belle mort, déclinant sur des millions d'années pour laisser place aux êtres supérieurs que nous sommes. Ainsi donc, ce serait un simple hasard, un coup du sort qui aurait exterminé les dinosaures et propulsé les mammifères au sommet du monde vivant ? Sacrilège !

Malgré le fait qu'il froisse les susceptibilités, l'article des Alvarez est très convaincant, car il relève de la plus pure démarche scientifique. Non seulement il élabore une hypothèse à partir d'observations sur le terrain et d'analyses en laboratoire, mais cette hypothèse débouche sur des prévisions : des pistes qui vont permettre de la confirmer, ou au contraire de l'infirmer.

En effet, si l'hypothèse était exacte, alors on devait trouver dans l'argile KT d'autres preuves de l'impact et, surtout, quelque part sur Terre, le site de la collision. Les auteurs vont même jusqu'à calculer la taille théorique du cratère à rechercher. D'après la quantité d'iridium dispersée sur l'ensemble du globe, et connaissant la teneur moyenne en iridium d'un astéroïde, de simples calculs donnent la masse et les dimensions du bolide : 10 kilomètres de diamètre, soit la taille de l'Everest. Et comme on connaît le rapport physique entre la taille d'un projectile et la taille du cratère résultant (20 fois plus grand), c'est une cicatrice circulaire de quelque 200 kilomètres de diamètre qui devait se cacher quelque part à la surface du globe.

Impact contre volcans

Le propre d'une belle hypothèse, c'est qu'elle prédit quelles découvertes supplémentaires sont nécessaires pour la confirmer, et qu'elle se prête au jeu de la critique. En science, en effet, une théorie n'est bonne que jusqu'à preuve du contraire. Il fut donc salutaire que des critiques se soient dressées contre l'hypothèse cosmique, critiques qui ont animé les débats et les congrès géologiques tout au long des années 1980.

Partant de la constatation que de grandes éruptions volcaniques se sont déroulées en Inde à la fin du Crétacé, Dewey McLean à l'université de Virginie avance en 1983 que les éruptions ont relâché tant de gaz carbonique dans l'atmosphère qu'il s'en serait suivi un réchauffement climatique insupportable pour le monde vivant. C'était là, en tout cas, le signe d'une prescience qu'un réchauffement climatique pouvait mettre en péril la diversité du monde vivant, avant même qu'on s'inquiète des émanations de dioxyde de carbone de notre propre civilisation.

Plusieurs équipes reprennent et renforcent ce scénario volcanique qui se pose en antithèse du concept de l'impact, à commencer par Charles Officer et Charles Drake à l'université de Dartmouth dans le New Hampshire, et Vincent Courtillot à l'Institut de physique du globe de Paris.

Les laves indiennes du Deccan, contemporaines de la fin du Crétacé et du début du Paléogène – et chevauchant donc la frontière KT –, sont en effet spectaculaires. Ce sont d'immenses épanchements de basalte, connus sous le nom de trapps, qui s'accumulent sur des surfaces plus grandes que la France, et sur plusieurs milliers de mètres

www.frenchpdf.com

d'épaisseur. Ces grandes crises sont espacées de dizaines de millions d'années : la dernière en date a affecté l'Amérique du Nord-Ouest il y a 16 millions d'années (Columbia River Plateau) ; une autre a recouvert une bonne partie de l'Éthiopie il y a 30 millions d'années ; celle du Deccan en Inde s'est déroulée il y a environ 65 millions d'années ; et ainsi de suite.

De telles crises volcaniques ne sont pas instantanées, mais s'étendent sur un à deux millions d'années, sous la forme d'un chapelet de grandes éruptions – chacune responsable de deux ou trois milliers de kilomètres cubes de lave épanchée en un ou deux ans – séparées par des intervalles de repos de plusieurs siècles à plusieurs millénaires. Pendant ces phases de sommeil, des lacs ou des bras de mer peuvent envahir les champs de lave (ce fut le cas en Inde), déposant des sédiments et accumulant des fossiles qui continuent d'enregistrer l'histoire du monde vivant entre deux paroxysmes éruptifs.

Dans le cas qui nous intéresse, les chercheurs qui proposent un tel volcanisme pour expliquer la disparition des dinosaures bâtissent leur argumentation sur les indices découverts dans l'argile KT, en soutenant qu'ils sont dus aux éruptions du Deccan en Inde et non à l'impact d'un astéroïde.

Partant du principe que l'iridium, rare à la surface de la Terre, est séquestré dans les couches profondes du globe, les tenants du volcanisme font valoir que les grandes éruptions comme celles du Deccan prennent justement racine dans les profondeurs du manteau terrestre, à l'interface avec le noyau de fer, et peuvent faire remonter de l'iridium dont une fraction est expulsée dans l'atmosphère par les gaz éruptifs.

La théorie est saine et l'enrichissement en iridium de tels « panaches » ou « points chauds » est avéré – on mesure de faibles concentrations d'iridium dans les gaz volcaniques de Hawaï et de la Réunion – mais les quantités sont nettement inférieures à celles mesurées dans la couche KT. En effet, même en purgeant tous les champs de lave du Deccan de cet élément rare pour l'insuffler dans l'atmosphère, on n'arrive pas au *centième* de ce que l'on trouve dans la couche d'argile. En outre, si l'on mesure la concentration d'autres métaux rares dans ladite argile, leurs proportions respectives dessinent une courbe, une sorte « d'empreinte digitale », qui est typique des météorites et des astéroïdes, et qui ne ressemble pas à celle des laves volcaniques.

Premier point en faveur de l'hypothèse cosmique.

Tout au long des années 1980, le match continue, avec la découverte de nouveaux indices dans la couche d'argile, qui sont passés au crible des deux théories.

C'est d'abord le cas de petites sphérules vitreuses, larges de quelques millimètres, qui saupoudrent la couche KT. Les premières furent découvertes par le géologue néerlandais Jan Smit sur un site en Espagne, puis on finit par les trouver un peu partout dans le monde.

Les adeptes du volcanisme avancent que ces microbilles de verre seraient de fines gouttelettes de magma retombées de fontaines de lave. Toutefois, leur analyse méticuleuse révèle une texture interne en fibres rayonnantes, qui est caractéristique d'une roche vaporisée qui se condense dans le vide – ou dans la très haute atmosphère – suite à un impact. Les astronautes Apollo en ont rapporté de nombreux échantillons des cratères de la Lune.

Deux points à zéro, en faveur de l'impact.

En 1983, un troisième indice est découvert dans l'argile KT : des grains de quartz disloqués par une pression gigantesque. Au microscope, ces « quartz choqués » montrent en effet des stries entrecroisées qui trahissent de violentes sautes de pression et un début de fonte dans les multiples plans de leur réseau cristallin. Or seuls les tirs de bombes atomiques et les collisions d'astéroïdes sont capables de générer des pressions aussi élevées dans les minéraux.

Les tenants du volcanisme soutiennent alors que des explosions volcaniques extraordinaires peuvent elles aussi choquer les cristaux de façon comparable, mais les exemples qu'ils soumettent, bien que légèrement déformés, ne tiennent pas la comparaison avec les quartz choqués de la couche KT : ils témoignent de pressions *mille fois* inférieures. En outre, les laves du Deccan ne contiennent pas de quartz à choquer (ce qui est embêtant), et quand bien même il y en aurait eu, catapulter lors d'une éruption volcanique des grains de quartz de plusieurs millimètres aux antipodes de la Terre (puisqu'on en trouve en Amérique du Nord) est physiquement impossible dans l'état actuel de nos connaissances.

Trois points à zéro en faveur de l'impact, et le score ne s'arrêta pas là : on trouva aussi dans l'argile KT des cristaux d'oxydes de fer riches en nickel (« spinelles nickélifères ») que les spécialistes, tel Éric Robin au laboratoire du CNRS de Gif-sur-Yvette, identifièrent comme provenant de la fusion d'un corps météoritique dans la haute atmosphère.

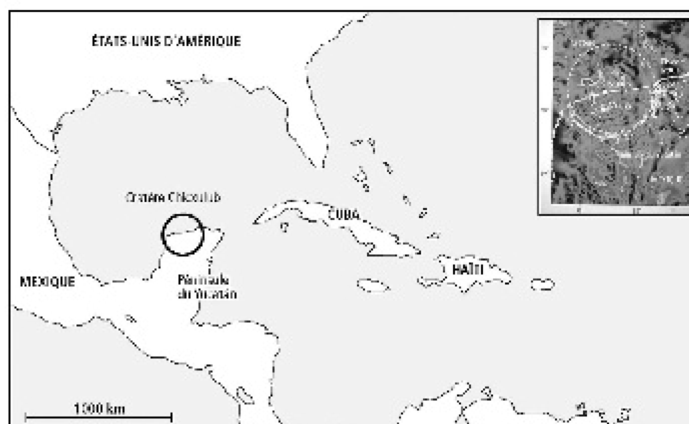
Lorsqu'une hypothèse repose sur un certain nombre d'affirmations et que l'on prouve que ces affirmations sont fausses, on s'attend logiquement à ce qu'elle soit retirée. Certains partisans du volcanisme s'agrippèrent néanmoins à leur théorie, et on verra qu'en France notamment ils furent assez influents pour que médias et public croient

www.frenchpdf.com

encore aujourd’hui que les éruptions en Inde ont eu quelque chose à voir avec la disparition des dinosaures.

La découverte du cratère

Dix ans durant, les preuves d’impact en provenance de la couche KT se sont donc accumulées, mais il manquait le fameux cratère de 200 kilomètres de diamètre qui aurait scellé la question. Au cours des 66 millions d’années écoulées depuis la collision, l’érosion aurait eu le temps de l’attaquer, mais il devait en rester quelque chose. À moins, avançaient les pessimistes, que l’astéroïde ait frappé le fond océanique, lequel a disparu depuis, escamoté par la tectonique des plaques et refondu dans le manteau terrestre. Mais même dans ce malheureux cas de figure[6], il aurait dû subsister sur le plateau continental et les rivages, quelque part sur Terre, les traces d’un gigantesque raz de marée.



Localisation du cratère d’impact de Chicxulub

En médaillon, la carte des anomalies du champ de gravité, trahissant la présence du cratère un kilomètre sous la surface du sol (Geological Survey of Canada). Les points blancs sont des cuvettes de dissolution dans le calcaire (*cenotes*) dont un certain nombre sont alignées sur une faille marquant la périphérie du cratère enfoui.

Les géologues nourrissaient un autre espoir. Si la couche KT représentait bien les fines poussières, gouttelettes de verre et grains minéraux fracassés et dispersés tout autour de la Terre par la déflagration, cette couche épaisse d’un centimètre en moyenne devrait considérablement s’épaissir à proximité du point d’impact. Selon les mesures faites autour de cratères d’impact connus, et en extrapolant pour la taille de celui recherché, on s’attendait ainsi à trouver une couche de débris de 30 centimètres d’épaisseur à 1 500 kilomètres du cratère, et de plus de 10 mètres d’épaisseur à moins de 500 kilomètres du point zéro.

Déjà, par rapport aux quelques millimètres d’argile trouvés tout autour de la Terre, les sites KT d’Amérique du Nord, notamment au Montana et au Colorado, se distinguaient par une couche d’argile de près de deux centimètres d’épaisseur. C’était assez pour convaincre un jeune étudiant de l’université de l’Arizona, Alan Hildebrand, d’y consacrer sa thèse et de passer au peigne fin les sédiments crétacés du sud des États-Unis, dans l’espoir que l’épaisseur croissante de la couche KT pointerait dans la direction du cratère.

Or justement, un tel affleurement de la fin du Crétacé était signalé au Texas sur les berges de la Brazos River, à une centaine de kilomètres du golfe du Mexique. On y trouvait de l’iridium, mais surtout un banc de sphérules – ces petites billes tombées du ciel – atteignant par endroits 30 centimètres d’épaisseur : cela correspondrait à une distance au cratère de 1 500 kilomètres. Tout aussi remarquable, un mètre de sable compacté au-dessus des sphérules indiquait que le fond marin de l’époque avait été secoué comme un tamis, soit par un tsunami, soit par un violent séisme qui aurait déclenché des coulées de sable sur le plateau continental.

Après avoir pris acte de ce premier site, Alan Hildebrand ne tarde pas à en étudier un second près de Port-au-Prince dans l’île d’Haïti, découvert quelques années plus tôt par le géologue haïtien Florentin Maurasse. Là aussi, le banc de sphérules mesurait 30 centimètres d’épaisseur et correspondait de même à une distance au cratère de 1 500 kilomètres.

Avec deux sites lui permettant de dessiner au compas sur la carte deux cercles de 1 500 kilomètres de rayon pour chercher le cratère, Alan Hildebrand obtient à leur intersection deux emplacements possibles : l’un d’eux se trouve dans le golfe du Mexique, côté Amérique centrale.

En se penchant sur les cartes et les photos satellite, on n’y décelait pas trace d’un cratère de grande taille, mais sur une carte régionale du champ de gravité – dont les infimes variations soulignent des différences de densité dans le

www.frenchpdf.com

sous-sol – une anomalie circulaire large de 180 kilomètres apparaissait au nord du Yucatán, à cheval sur la ligne de côte, telle une oblitération géante. Cela trahissait quelque chose de bien profond, hors d'atteinte des recherches en surface, mais à prendre en ligne de compte.

Digne d'un roman policier, la quête du cratère fait entrer en scène d'autres personnages et une singulière histoire parallèle. Cette structure circulaire sous le Yucatán, décelée par gravimétrie au lendemain de la Seconde Guerre mondiale, avait fait l'objet d'une exploration au moyen de forages dès les années 1950, car il aurait pu s'agir d'un bassin sédimentaire ou d'un dôme enfoui, c'est-à-dire d'un piège à pétrole. La Pemex – la société pétrolière mexicaine – avait ainsi foré jusqu'à 1 500 mètres de profondeur pour échantillonner la structure enfouie. Le forage avait fini par buter sur un socle volcanique, du moins en apparence : des roches à moitié vitreuses que les opérateurs avaient cataloguées comme étant des andésites, similaires aux laves que crachent la plupart des volcans mexicains.

Toutefois, lorsque la Pemex refit une analyse détaillée de la région à la fin des années 1970, le géologue Antonio Camargo et son consultant américain Glen Penfield se mirent à réfléchir sur la nature de l'étrange bassin enfoui. Il n'avait ni la forme ni la taille – bien trop grande – d'une caldera volcanique, l'empreinte du champ de gravité évoquant plutôt celle d'un cratère d'impact. Les deux associés présentèrent leur hypothèse, insolite à l'époque, lors d'un congrès de géologues pétroliers à Los Angeles, en octobre 1981.

C'est un journaliste sur place, Carlos Byars du *Houston Chronicle*, qui fit le rapprochement avec l'hypothèse toute récente des Alvarez, et publia dans son quotidien texan qu'il pouvait s'agir là du cratère de la fin des dinosaures. Sorti en première page dans le numéro du 31 décembre, l'article passa pourtant inaperçu – les Texans étant occupés à préparer leur réveillon – et l'hypothèse de Penfield et Camargo retomba comme un soufflé. Il avait été publié en avance sur son temps, et le mauvais jour de surcroît.

Mais pas au mauvais endroit. Si Houston est la capitale américaine du pétrole, elle est aussi le fief des planétologues qui s'y réunissent tous les ans au mois de mars pour présenter leurs recherches sur la Lune, les planètes… et les cratères d'impact. Dix ans après avoir rencontré Camargo et Penfield, le même journaliste Carlos Byars y assiste à la présentation d'un certain Alan Hildebrand qui décrit sa quête du cratère dans le golfe du Mexique. Carlos Byars se rend compte qu'il détient la clé de l'énigme : il aborde Hildebrand après sa présentation et lui conseille de prendre contact avec Camargo et Penfield, certain que cette fois ils seront entendus.

Et c'est bien le cas. Hildebrand, Penfield et Camargo confrontent leurs recherches, analysent les échantillons des fameux forages de la Pemex et identifient sans l'ombre d'un doute les roches prétendument volcaniques comme étant des « fontes d'impact » : de la roche locale fondue par l'extraordinaire collision.

Restait à publier leur découverte et, contrairement à ce que l'on pourrait penser, ce ne fut pas une simple formalité. Les revues scientifiques ont une politique éditoriale saine en théorie, à savoir qu'un panel d'experts – généralement au nombre de trois – juge si un article est recevable sur la base de son intérêt, de sa connaissance des travaux antérieurs et de la justesse de ses techniques d'analyse. Le revers de la médaille, c'est qu'il peut y avoir une volonté éditoriale de favoriser certaines écoles de pensée ou certains auteurs plutôt que d'autres, les « juges » gardant forcément une certaine part de subjectivité. Certains peuvent même tenter de bloquer un article pour des raisons personnelles, la jalousie n'étant pas absente du monde scientifique.

Ce fut le cas pour l'article d'Hildebrand, Penfield et Camargo, soumis à la prestigieuse revue *Nature*. Un membre influent du comité de lecture n'avait guère de sympathie pour l'hypothèse d'un cratère mexicain, car elle mettait en doute ses propres travaux – le juge en question tenant son propre cratère, enfoui sous les grandes plaines de l'Iowa aux États-Unis, comme la source de la couche KT et le responsable de la grande extinction. Apparemment il avait un allié au sein du comité de lecture, puisque l'article d'Hildebrand et consorts fut rejeté à deux voix contre une.

Sans se démonter, les chercheurs soumirent leur manuscrit à une autre revue, le mensuel américain *Geology*, et si le destin voulut que le même expert siège à nouveau dans le comité de lecture, il fut cette fois mis en minorité par ses deux partenaires. L'article fut publié en septembre 1991, faisant autant de bruit dans le petit monde des géologues que l'article fondateur des Alvarez, onze ans plus tôt. Le cratère de la fin des dinosaures venait d'être découvert et correspondait en tout point au portrait-robot du suspect recherché.

Portrait du meurtrier

Les planétologues, tout comme le grand public, apprennent à prononcer son nom maya : le cratère de Chicxulub (« Chic-chou-loube ») est nommé d'après le petit port de pêche du Yucatán, situé au point zéro de la catastrophe.

Il y a 66 millions d'années, le niveau marin était plus élevé et la plate-forme calcaire du Yucatán reposait sous plusieurs dizaines de mètres d'eau. L'impact bouleversa la région en une poignée de secondes, creusant une cavité béante de plusieurs kilomètres de profondeur que la mer envahit en trombe. Une fois le calme revenu, le bassin du cratère se remplit de sédiments : au fil des millions d'années, il s'est inexorablement enfoui, ployant sous sa charge jusqu'à disparaître 1 500 mètres sous la surface du sol. Comme on l'a vu, ce sont les anomalies gravimétriques et magnétiques qui ont trahi sa présence, et les forages qui l'ont échantillonné en de rares endroits.

www.frenchpdf.com

Si vous avez l'opportunité de visiter la péninsule du Yucatán, ses ruines mayas et ses villages charmants, ne vous étonnez pas si vous n'apercevez aucun signe flagrant du cratère en surface. Et pourtant il en émane une trace subtile, sous la forme d'un alignement de petits trous d'eau en arc de cercle à travers la brousse, qui dessine en pointillé la circonférence du cratère enfoui. Ces trous d'eau, appelés *cenotes*, ont été creusés – à vrai dire sapés par en dessous – lors de la migration des nappes phréatiques souterraines qui s'écoulent sous le Yucatán. Les eaux légèrement acides sont déviées vers la surface par les failles à la périphérie du cratère, et y rongent le sol calcaire par endroits. Le long de cette signature en arc de cercle, des mesures altimétriques montrent une inflexion discrète de la surface, quatre à cinq mètres sous le niveau moyen du plateau. À peine percevrez-vous une légère déclivité de la route en traversant cette frontière fantôme…

Un kilomètre et demi sous le sol se cache donc l'invisible meurtrier, dont les campagnes géophysiques et de nouveaux forages ont toutefois dressé un portrait détaillé.

Notre connaissance des cratères d'impact accessibles en surface, tant sur la Terre que sur la Lune, et les modèles de formation que l'on peut en dresser sur ordinateur nous enseignent qu'un impact de cette taille vaporise totalement le bolide (« l'impacteur »), vaporise et liquéfie un volume dix fois supérieur de roche terrestre au point zéro (« la cible »), et fracasse alentour, à l'état solide, un volume 300 fois supérieur de blocs rocheux, propulsés hors du trou béant comme des obus.

La cavité qui s'est ouverte au point zéro, aux dimensions estimées à 90 kilomètres de diamètre et 15 kilomètres de profondeur, a immédiatement commencé à s'effondrer et à s'évaser en glissements de terrain gigantesques. Il suffit de regarder le cratère Copernic sur la Lune avec un petit télescope d'amateur pour appréhender la forme que prend un tel bassin d'impact, avec ses terrasses d'effondrement périphériques et son curieux pic central. Dans le cas du Chicxulub, c'est un véritable plateau qui s'est soulevé au centre du bassin, par rebond élastique de la croûte comprimée. Une fois ce nouveau profil atteint par le cratère en quelques dizaines de minutes de réajustements titanesques, les dimensions finales se sont stabilisées à 180 kilomètres de bord à bord, 40 kilomètres de large pour le plateau central, et un à deux kilomètres « seulement » de dénivelé dans la douve annulaire qui sépare le plateau central des terrasses périphériques.

En plus des glissements de terrain lubrifiés par le retour en force de la mer, il faut en effet imaginer une pluie de blocs retombant du ciel et qui aident à combler le bassin. Certaines couches sont constituées de blocs à moitié fondus qui ressemblent à des laves ; d'autres sont faites de roches fracassées, aux fragments collés ensemble par une chaude matrice : on les appelle des « brèches d'impact ».

Lorsqu'on analysa ces laves et ces brèches d'impact du fond du cratère, recueillies par les forages de la Pemex, leur analyse chimique montra une composition riche en calcium correspondant parfaitement à celle des sphérules retrouvées partout sur Terre dans l'argile KT. D'autre part, la datation des laves d'impact au fond du cratère révéla un âge identique à celui de ces mêmes sphérules de la couche KT : 66 millions d'années exactement[7]. Avec la publication en 1992 de ces équivalences indiscutables entre cratère de Chicxulub et couche KT, tant chimique que temporelle, la thèse de l'impact était scellée. Elle n'a cessé pourtant d'être contestée par un petit nombre de chercheurs non convaincus, une polémique qui mérite d'être racontée car elle montre comment la science peut fonctionner sainement grâce à la critique, mais peut aussi être entravée par des manœuvres politico-médiatiques. On retrouvera ces mêmes manœuvres dans le débat actuel sur le réchauffement climatique et par ricochet sur les extinctions en cours à notre époque.

Les remous médiatiques

Il n'y avait pas d'argent à gagner, pas de lobby industriel qui pouvait profiter d'une fin brutale ou au contraire progressive des dinosaures. Pourtant la démonstration sans faille d'un impact d'astéroïde comme cause de la grande extinction des espèces à la fin du Crétacé a fait des mécontents, à commencer par les chercheurs qui avaient misé sur le mauvais cheval.

Avant que le cratère ne soit découvert, les partisans d'une disparition progressive des dinosaures, jumelée à des éruptions volcaniques en Inde étirées sur des centaines de milliers d'années, pouvaient faire valoir leurs arguments, quoique singulièrement affaiblis par la démonstration que leurs hypothèses de départ étaient toutes fausses : dans la couche KT ayant servi de point de départ au débat, ni iridium, ni quartz choqués, ni sphérules vitreuses n'étaient d'origine volcanique. Leur position devenait moins tenable encore lorsque le cratère d'impact fut découvert et daté.

Pour les tenants de l'hypothèse volcanique, la découverte du cratère est bien sûr très mal vécue. Durant quelques mois, ils y voient un éventuel volcan. Puis, devant les preuves irréfutables d'impact, annoncent que celui-ci a eu lieu bien avant la crise KT (donc ne fut pas sa cause directe), sur la foi d'une mésinterprétation des sédiments au fond du cratère. Faisant le grand écart à partir de cette nouvelle erreur, certains avancent même que puisque la couche KT ne serait pas contemporaine du Chicxulub, alors il resterait un second cratère d'impact encore plus grand à découvrir. Au passage, on notera que ces chercheurs n'ont eu aucune difficulté à tourner le dos au volcanisme, qu'ils ont défendu durant dix ans, et à passer du refus d'un impact à la thèse d'un double impact, thèse qui s'est révélée tout aussi fausse[8].

www.frenchpdf.com

Et les volcans en Inde dans tout ça ? Si les fameux trapps du Deccan recouvrent bien, dans leur vaste durée, la crise de la fin du Crétacé – ce que démontrent le chercheur français Vincent Courtillot et son équipe sur la foi de données géomagnétiques – plus rien ne les relie à la couche d'argile KT. Cela n'empêche pas les partisans du Deccan de continuer à affirmer après la découverte du cratère que le volcanisme a néanmoins joué un rôle plus important que l'impact de l'astéroïde dans la grande extinction du monde vivant ; puis de concéder que l'impact a bien été le mécanisme principal de l'extinction, mais qu'il n'a eu cet effet que parce que les éruptions avaient au préalable fragilisé et « condamné » la biosphère.

Ce dernier scénario est séduisant et a le mérite de réconcilier les deux thèses, comme si tout le monde avait raison, au terme d'un sympathique compromis. C'est d'ailleurs la version présentée par nombre de médias français, car les partisans du volcanisme ont beaucoup œuvré en coulisse pour défendre cette nouvelle version des événements.

Or elle n'est pas plus soutenue par des preuves que les scénarios volcaniques précédents. Aucun indice de la couche KT, qui marque l'effondrement de l'écosystème, ne pointe comme on l'a vu vers les éruptions du Deccan. Seul un déclin progressif de cet écosystème sur des centaines de milliers d'années, correspondant à la durée du volcanisme, accréditerait le scénario. C'est ce déclin progressif du monde vivant, avant l'impact, qu'ont tenté de prouver les partisans du Deccan, mais là aussi sans succès, comme on va le voir.

S'il est difficile de trancher entre disparition soudaine et déclin progressif de la biosphère sur quelques centaines de milliers d'années en se fondant sur des ossements de dinosaures, trop rares pour analyser la séquence temporelle avec autant de précision, on peut en revanche se tourner vers les microfossiles de plancton. Ceux-là pullulent à l'échelle millimétrique dans les sédiments marins, et donc nous donnent une vision à haute résolution de la crise.

Or les partisans du volcanisme, à commencer par la géologue Gerta Keller de l'université de Princeton, ont soutenu qu'ils voyaient des disparitions progressives d'espèces de plancton, étalées sur des centaines de milliers d'années jusqu'à la couche KT, alors que d'autres géologues, comme Jan Smit de l'université libre d'Amsterdam, voyaient ces mêmes espèces peupler les sédiments jusqu'au niveau exact de l'argile de l'impact. De toute évidence, l'un des camps devait se tromper.

Les géologues qui étudiaient la crise ont donc organisé une confrontation, une « dégustation à l'aveugle » du plancton. À partir d'échantillons prélevés tous les quelques centimètres sur un site à « haute résolution » particulièrement riche en microfossiles (le site d'El Kef en Tunisie), plusieurs équipes de spécialistes, dont les protagonistes, ont pointé les espèces de plancton au microscope, sans savoir de quels niveaux sous la couche KT provenaient les échantillons, afin de ne pas être influencés par leurs croyances respectives.

Conclusion édifiante : pour un même échantillon, les différentes équipes parvenaient à des résultats différents, certaines « manquant » une espèce et en déduisant, à tort, sa disparition prématurée. En revanche, en fusionnant les résultats de toutes les équipes, *toutes* les espèces de plancton étaient pointées jusqu'à la fatidique couche d'argile, preuve d'un massacre au moment exact de l'impact et non de façon progressive, comme le voulait la théorie volcanique.

Les mauvaises langues diront qu'il y avait là de bons et de mauvais spécialistes. Avec plus de tact, on dira qu'il est humain de manquer ou de ne pas reconnaître une espèce de plancton, et qu'il vaut mieux être plusieurs pour cerner la vérité.

À un niveau socioculturel, on peut se demander pourquoi les théories fausses, ou en tout cas non fondées, ont autant la vie dure. Pourquoi, un quart de siècle après la découverte du cratère d'impact de Chicxulub, entend-on encore, et notamment en France, que les dinosaures et autres formes de vie de la fin du Crétacé ont disparu à cause *à la fois* d'un impact d'astéroïde et d'éruptions volcaniques en Inde ?

A priori, cela peut être tout simplement un problème d'ego. Personne n'aime avoir tort, d'autant plus un chercheur pour lequel la recherche de la vérité est un métier. Il est donc normal de se cramponner à sa théorie, surtout si on reste convaincu d'avoir raison, contre vents et marées.

Cela peut aussi être un problème de pouvoir et d'intérêts privés, ce qui est plus troublant. À partir du moment où l'on profite de sa renommée scientifique pour obtenir des subventions, vendre des livres ou jouer un rôle politique, il devient très important de ne jamais avoir tort.

D'un point de vue médiatique, le bénéfice est flagrant. Les médias adorent la controverse. Un mystère résolu est beaucoup moins intéressant qu'une prise de bec entre chercheurs de bords opposés. L'effet pervers est que ceux qui soutiennent une thèse minoritaire – peu importe qu'elle soit fausse – tirent un plus grand profit de cette mansuétude des médias que ceux, plus nombreux, qui soutiennent la thèse établie. Comme ils sont moins nombreux, les premiers seront invités plus fréquemment à titre individuel que les seconds dans les studios de radio et de télévision. C'est donc toujours les mêmes que l'on verra, ce qui amplifiera constamment leur renommée médiatique et ce qui peut en découler (vente de livres, carrière politique). Au final, et même si ce n'est pas un calcul conscient (bien que dans certains cas, cela puisse l'être), on a autant intérêt à avoir tort qu'à avoir raison, sinon plus…

www.frenchpdf.com

Si elle se limite à des gains personnels dans le cas de la mort des dinosaures, la négation de théories bien fondées, avec la dérive médiatique qui s'ensuit, peut aussi entraîner des conséquences beaucoup plus délétères, comme on le verra plus tard dans le débat sur le réchauffement climatique. Et on s'aperçoit bizarrement, en tout cas en France, que cette sorte de « dénialisme » scientifique, qu'elle touche aux dinosaures ou au réchauffement climatique, est souvent colportée par les mêmes personnes.

Rôle des volcans : nouveau rebondissement

On croyait la controverse éteinte. Les partisans du volcanisme, l'invoquant comme cause de la fin des dinosaures, avaient d'abord avancé que la couche d'argile marquant l'effondrement de l'écosystème provenait d'éruptions majeures en Inde (les trapps du Deccan). Ils furent déboutés, l'argile étant aujourd'hui attribuée sans conteste à l'impact d'un astéroïde.

Les « volcanistes » avancèrent alors que si les éruptions n'étaient peut-être pas la cause principale de la grande extinction du monde vivant, elles l'avaient préparée, affaiblissant l'écosystème avant l'impact de l'astéroïde. Leur position portait sur l'interprétation que le gros du volcanisme en Inde avait eu lieu *avant* l'impact. Là aussi, aucune preuve n'appuie ce scénario, les études fines (du plancton marin par exemple) ne montrant aucun déclin de la biosphère durant les centaines de milliers d'années de volcanisme précédant le choc avec l'astéroïde.

En 2015, nouveau rebondissement : le chercheur Paul Renne (université de Californie, Berkeley) et son équipe, qui ont daté nombre de couches de lave en Inde, font remarquer au contraire que les éruptions les plus volumineuses ont lieu des dizaines de milliers d'années… *après* l'impact de l'astéroïde. S'éloignant de la thèse selon laquelle les éruptions ont *causé* la grande extinction du monde vivant, ils avancent désormais qu'elles ont nui à *la récupération* de l'écosystème après la crise. Or il s'agit toujours d'un scénario – l'effet délétère des éruptions sur la biosphère n'étant pas plus prouvé que dans les scénarios précédents.

Scénario d'un désastre : effets régionaux

Désastre : le mot tombe à pic pour décrire le massacre des espèces vivantes à la fin du Crétacé, car il signifie au sens propre la chute d'un astre. Le choix du mot scénario est tout aussi significatif : si nous avons décrit jusqu'à présent l'impact de l'astéroïde comme une thèse, appuyée par des preuves, les mécanismes mêmes qui ont mené à l'effondrement de l'écosystème sont aussi nombreux qu'hypothétiques, et leurs contributions respectives reposent sur des calculs et des indices discutables.

Ce que nous allons présenter ici est donc un scénario. Les effets imaginés par les chercheurs sont toutefois importants à dépeindre : certains pourraient en effet rejouer dans les extinctions actuelles du monde vivant, notamment les synergies ou effets amplificateurs qu'un mécanisme peut avoir sur un autre.

Tout d'abord, il faut souligner l'extrême brutalité d'un impact de la magnitude de Chicxulub, c'est-à-dire une grande puissance délivrée en un temps très court. La taille de l'astéroïde, déduite de celle du cratère (et aussi indépendamment à partir de la quantité d'iridium dispersé dans la couche KT à travers le monde), est très bien circonscrite : 6 à 10 kilomètres de diamètre. Imaginez donc un objet de la taille du massif du Mont-Blanc, filant vers la Terre à une vitesse avoisinant 20 kilomètres par seconde – la vitesse relative moyenne d'un astéroïde qui croise l'orbite de la Terre[9].

Le facteur vitesse est redoutable, car l'énergie de la collision est proportionnelle à la masse de l'astéroïde multipliée par la vitesse *élevée au carré* (précisément $1/2\ mv^2$, comme vous le diront les lycéens). La collision a donc libéré en quelques secondes une énergie équivalente à 100 millions de mégatonnes de TNT, soit 10 000 fois l'arsenal nucléaire de toute l'humanité, ou encore six milliards de fois la bombe d'Hiroshima. Cette dernière comparaison permet de bien marquer les esprits : c'est comme si, aujourd'hui, tous les habitants de la Terre faisaient exploser, chacun en même temps, une bombe d'Hiroshima.

Cette délivrance presque inconcevable d'énergie concerne au départ un seul point sur Terre – le point zéro au nord du Yucatán – mais on va voir comment cette énergie va être distribuée tout autour du globe en l'espace de quelques heures seulement.

Autour du point zéro, la dévastation est évidemment totale. La trombe de roche vaporisée – un plasma à plus de 10 000 °C – grimpe dans le ciel en rayonnant une énergie telle que les forêts s'enflamment spontanément dans un rayon de 1 500 kilomètres au moins. L'onde de choc dans l'atmosphère se traduit par des vents atteignant 1 000 kilomètres par heure, également dans un rayon de 1 500 kilomètres ; quant aux vibrations qui secouent la croûte terrestre, elles dépassent vraisemblablement la magnitude 12 sur l'échelle de Richter, soit une violence 100 à 1 000 fois supérieure à celle des plus grands séismes de l'histoire.

Quant aux ondes générées en mer, sous la forme de tsunamis à partir du point zéro, mais aussi à partir des masses de roche fracassées qui retombent dans le golfe du Mexique et des glissements de terrain sur le talus continental, elles ont raclé les fonds marins en roulant des blocs de la taille d'immeubles (repérés dans les sédiments) et se seraient soulevées le long des côtes en vagues hautes d'une centaine de mètres d'après les calculs (par

www.frenchpdf.com

comparaison, celles de Tohoku-Fukushima en 2011 au Japon et de Sumatra-Andaman en 2004 en Indonésie atteignaient 30 à 40 mètres).

A-t-on des preuves de tout cela ? Pour les incendies, les calculs sont assez robustes et la couche KT renferme énormément de suie de combustion. Nous reviendrons sur la propagation d'incendies au-delà de 1 500 kilomètres, due à un second mécanisme venu s'ajouter au rayonnement de la boule de feu initiale. On remarque aussi que la végétation est plus sérieusement détruite en Amérique du Nord qu'ailleurs, ce qui semble indiquer que le projectile se déplaçait du sud vers le nord, direction qu'aurait également suivie la boule de feu de l'impact.

Pour ce qui est des tsunamis, les preuves sont directement visibles sur place. Dès le début des années 1990, alors qu'ils convergeaient dans leur quête du cratère vers le golfe du Mexique, et conscients qu'un impact dans le golfe aurait forcément laissé la trace d'un tsunami dans les sédiments aujourd'hui exondés, les chercheurs passèrent au peigne fin les strates crétacées le long de la Sierra Madre, dans la province mexicaine du Nuevo León. Dans ce qui fut autrefois un fond marin, Walter Alvarez et le Néerlandais Jan Smit découvrirent un banc de sable insolite, épais de trois mètres, qui interrompait brutalement la séquence normale des sédiments. De toute évidence, il s'agissait là de la marque d'une secousse sismique extraordinaire, doublée d'un tsunami, qui avait ravagé le plateau continental et le rivage de l'époque, entraînant une avalanche sous-marine de sable et autres débris vers les grands fonds.

Avec Jan Smit pour guide, j'ai eu l'occasion d'arpenter ces impressionnants affleurements mexicains en février 1994, trois ans après leur découverte. Sur l'un des sites, en remontant le lit d'un ruisseau asséché (l'Arroyo El Mimbral), on parvient à un empilement de strates haut de plusieurs mètres, où l'on discerne à la base un banc de sphérules d'impact, épais d'une trentaine de centimètres, qui matérialise la chute de billes de verre depuis la boule de feu qui a roulé sur le golfe. Cette couche est surmontée par deux mètres d'épaisseur de sable, déposé quelques minutes plus tard par le tsunami qui a dévasté la côte mexicaine – un sable truffé de fragments végétaux entraînés dans les grands fonds par le reflux du raz de marée. Enfin, au sommet de la pile, les strates terminales ont des ondulations bien marquées : elles trahissent les oscillations du courant sur le fond marin – appelées seiches – à mesure que le balancement du tsunami, d'un côté à l'autre du golfe, a progressivement décru.

Environ 200 kilomètres plus au nord, sur le site d'El Peñon, on retrouve la même séquence, mais encore plus épaisse – près de sept mètres de sable – avec au sommet les mêmes ondulations du tsunami mourant, dégagées par l'érosion en un sol bosselé sur lequel on peut marcher. Étrange et bouleversante impression que de parcourir à pied sec le fond d'une mer où s'est déroulé, il y a 66 millions d'années, un tel événement.

Scénario d'un désastre : effets mondiaux

On imagine aisément comment les populations d'animaux et de plantes ont été massacrées à l'échelle régionale, brûlées, soufflées et noyées par la déflagration. Mais ces mécanismes « proximaux » ne suffisent pas à expliquer comment les espèces ont été touchées à l'échelle mondiale, au point d'entraîner leur extinction.

On a vu comment Luis Alvarez a eu l'intuition qu'il s'agissait d'un obscurcissement global de l'atmosphère terrestre, coupant net la photosynthèse sur terre comme en mer, et menant à l'effondrement de la chaîne alimentaire tout entière. Avec ses coauteurs, il expose ce concept dans leur article fondateur de 1980.

Ce scénario tient-il la route ?

Oui, et de façon très convaincante si on se penche de plus près sur le déroulement d'un gros impact à la surface de la Terre.

En même temps qu'il a fait jaillir une boule de feu au point zéro, l'impact de Chicxulub a fait gicler une quantité énorme de roches fracassées : plus de 300 fois la masse de l'astéroïde. Ces projectiles, appelés « éjectas », ont fusé dans toutes les directions à des vitesses de plusieurs kilomètres par seconde, la déflagration ayant soufflé toute atmosphère qui aurait pu les freiner. Au contraire, un coussin de gaz en expansion a dû même accélérer ces « missiles » en partance pour l'espace.

Car il s'agit d'un véritable lancement de missiles, visant la Terre entière. On notera d'ailleurs que si Luis Alvarez puisa son inspiration dans les grandes éruptions volcaniques pour imaginer l'Armageddon d'un impact, des scientifiques à la même époque commencèrent à modéliser les conséquences climatiques d'un échange de missiles entre Russes et Américains – la Guerre froide ayant repris de plus belle sous Ronald Reagan. Ils débouchèrent sur le concept d'un « hiver nucléaire » où poussières et suie de combustion soulevées par les bombes obscurciraient l'atmosphère et feraient chuter la température mondiale, tout comme le ferait une gigantesque éruption.

Cela étant, avant d'engendrer un « hiver nucléaire », les éjectas qui pleuvent sur la planète dégagent une chaleur intense. Même s'il ne s'agit pas de bombes atomiques, leur masse et leur vitesse relâchent en effet beaucoup d'énergie lors de leur retombée, puisque l'atmosphère est bien présente sur les trajectoires de retour et s'échauffe par friction au passage.

Jay Melosh de l'université de l'Arizona, spécialiste des impacts, entreprit les premiers calculs qui suggèrent que tout

www.frenchpdf.com

autour du globe, la haute atmosphère échauffée rayonne tellement d'énergie vers le sol (10 kilowatts au mètre carré) que la température y aurait atteint 250 °C durant plusieurs dizaines de minutes. Selon ces premières estimations, la majorité de la biosphère terrestre – végétaux et animaux confondus – aurait tout simplement grillé à mort.

Dans le détail, le scénario est plus nuancé. De nouveaux calculs entrepris en 2009 font valoir que les fines particules qui retombent dans l'atmosphère – les fameuses sphérules de verre – créent un écran qui tamise le rayonnement infrarouge et modère la température au sol. D'autre part, les conditions météo locales ont une influence sur le résultat : un ciel sans nuage laisse passer un maximum de rayonnements, alors qu'un ciel couvert leur oppose des gouttelettes d'eau dont la vaporisation absorbe une bonne partie de l'énergie incidente.

A-t-on des preuves de cet effet rôtissoire ?

Oui et non.

Dès 1985, la chimiste Wendy Wolbach de l'université de Chicago publie des analyses de la couche KT où elle identifie des poussières de carbone : une suie qui ressemble aux produits de combustion de la matière organique. D'autres chercheurs trouvent des molécules carbonées complexes, notamment de la rétène qui pourrait provenir de la combustion des conifères. En revanche, les critiques s'étonnent que l'on ne trouve qu'une quantité somme toute modeste de charbon de bois dans la fine couche d'argile KT, voire du bois non brûlé sur certains sites.

Au final, ces découvertes ne sont pas contradictoires, puisqu'on a vu combien la météo locale a pu moduler la quantité de chaleur reçue au sol. Certaines régions ont manifestement été plus touchées que d'autres et portées à plus haute température, d'autant que la distribution des « missiles » fut loin d'être uniforme.

Ajoutons toutefois un dernier indice : sur les continents, les premiers sédiments juste au-dessus de la couche KT ne contiennent plus de pollen d'arbres à fleurs, mais presque exclusivement des spores de fougères – végétal résistant et « opportuniste », bien connu pour être l'une des premières plantes à repeupler la terre dévastée après un feu de forêt.

Si l'ampleur des incendies reste encore à préciser, et avec elle la quantité de suie relâchée dans l'atmosphère, les poussières minérales soulevées par l'impact, pleuvant du ciel et provoquant un obscurcissement de l'atmosphère, sont incontournables : leur volume est facile à calculer. C'était le mécanisme d'extinction initial proposé par Luis Alvarez. Cependant dans le détail, on va voir que le monde vivant a singulièrement manqué de chance.

L'effet de cible

Les statistiques nous enseignent qu'un impact comparable à celui de Chicxulub devrait survenir sur Terre tous les 100 à 150 millions d'années en moyenne. Quant aux impacts dix fois moins puissants, créant des cratères d'une centaine de kilomètres de large, ils devraient être dix fois plus nombreux. Or, s'il y a bien eu deux ou trois autres grandes extinctions du monde vivant au cours des 500 derniers millions d'années, seule celle de la fin du Crétacé est associée sans l'ombre d'un doute à un impact. Pourquoi cet impact fut-il le seul à engendrer un effondrement spectaculaire du monde vivant ?

Pour ce qui est des nombreux impacts plus petits, il est facile d'invoquer un seuil minimal de nocivité planétaire. En deçà d'une certaine énergie de collision, les effets dévastateurs resteraient régionaux. Quand bien même seraient-ils mondiaux que les populations ne seraient pas complètement exterminées : les espèces ne subiraient pas d'extinctions notables.

Pour s'en persuader, il suffit de considérer deux cratères de calibre « moyen » : Manicouagan au Québec et Popigaï en Sibérie, âgés respectivement de 214 et 35 millions d'années. Ces cratères mesurent environ 80 kilomètres de taille, c'est-à-dire qu'ils n'ont relâché qu'un dixième de l'énergie que l'on prête au Chicxulub10. Ce n'est pas du tout la même chose, et cette différence d'échelle suffirait à expliquer que l'on n'enregistre pas d'effondrement de la biosphère associé à ces cratères.

www.frenchpdf.com



Le cratère de Manicouagan, au Québec, photographié depuis la Station spatiale internationale. D'un diamètre de 80 km, il n'a pas entraîné d'extinctions notables lors de son impact, il y a 214 millions d'années. L'impact du Chicxulub, responsable du massacre des dinosaures à la fin du Crétacé, fut dix fois plus violent. (© NASA/ISS.)

Mais où sont les deux autres impacts de la taille de Chicxulub qui auraient dû survenir, d'après le calcul des probabilités, au cours des 500 derniers millions d'années et laisser une empreinte tout aussi catastrophique dans l'histoire du monde vivant ? Ont-ils seulement eu lieu ?

Les probabilités ne sont que de la théorie, et rien ne prouve que le Chicxulub n'ait pas été en réalité le seul gros impact durant cette période. En revanche, si d'autres grands impacts ont effectivement eu lieu, ils n'ont pas laissé de traces pour des raisons qui restent à comprendre, et seul l'impact de Chicxulub aurait déclenché une crise mondiale. Une telle raison, faisant de Chicxulub un impact exceptionnel, semble se dessiner si l'on considère que ce n'est pas seulement le calibre de la collision qui a son importance, mais aussi le lieu où celle-ci se produit. Les géologues ont pris la mesure de ce nouveau facteur – « l'effet de cible » – en se rendant au point zéro de l'impact, sur la plate-forme du Yucatán.

À Manicouagan et Popigaï, les astéroïdes avaient percuté de la roche dure et cristalline, principalement du granite et du gneiss, une grande part de l'énergie des bolides ayant servi à disloquer, liquéfier et vaporiser cette roche réfractaire. Sur le site de Chicxulub, par contraste, s'il y a bien du granite et du gneiss en profondeur, ce socle cristallin est surmonté de plusieurs kilomètres d'épaisseur de sédiments côtiers : des calcaires à base de plancton et des sels précipités au fil des millions d'années par l'évaporation de l'eau de mer.

Or il s'agit là de substances extrêmement volatiles : sous le coup de l'impact, ces carbonates et ces sulfates se sont décomposés en vapeurs de carbone et de soufre, la quantité de soufre injectée dans l'atmosphère ayant notamment été estimée à *500 milliards de tonnes* (500 gigatonnes) au bas mot. À titre de comparaison, la pollution annuelle due à nos industries atteint à peine le dixième de gigatonne, soit 5 000 fois moins. En d'autres termes, l'impact de Chicxulub a relâché autant de dioxyde de soufre en quelques secondes que nos industries en 5 000 ans au taux actuel.

Cette vaporisation massive de soufre lors de l'impact est fondamentale, car le soufre s'hydrate rapidement pour former de minuscules cristaux d'acide sulfurique : ils restent longtemps suspendus dans la haute atmosphère et interceptent la lumière solaire. En plus des poussières, ce voile contribue à obscurcir et à refroidir la Terre dans des proportions sans commune mesure avec les « petites » crises volcaniques que furent Tambora en 1815, Krakatau en 1883, ou encore Pinatubo en 1991 (0,02 gigatonne).

Si ces éruptions historiques ont causé une baisse de la température atmosphérique de l'ordre de 0,5 à 1 °C durant un an, les modèles numériques suggèrent que le soufre émis par le Chicxulub a instauré une chute durable de la température de l'ordre de 10 °C durant plusieurs années, voire plusieurs décennies.

Il convient de bien marquer la différence entre l'impact de l'astéroïde et celui des grandes éruptions en Inde qui sévissaient à la même époque. Les partisans du Deccan ont fait valoir que le dégazage des champs de lave indiens a été considérable, mais il l'a été sur le long terme. En considérant la totalité des éruptions, le soufre émis a été certes comparable, voire dix fois supérieur à celui relâché par l'impact de l'astéroïde. La grande différence, c'est qu'il fut total et instantané dans le cas de l'impact, et dilué sur près d'un million d'années, voire plus, dans le cas des trapps du Deccan. Cela ramène la contribution de ces derniers à une moyenne d'un millième de gigatonne de soufre par an (100 fois moins que nos émissions industrielles), bien que ces émissions ont dû être ponctuellement plus importantes puisque les trapps du Deccan ont fait éruption par saccades, avec une centaine de grands cycles éruptifs, séparés par de longs intervalles de repos. Mais même dans ce cas de figure, les émissions gazeuses n'ont pas dû dépasser une dizaine de gigatonnes de soufre lors d'un cycle, ce qui équivaut durant ces périodes actives à

www.frenchpdf.com

une moyenne annuelle d'un dixième de gigatonne – notre taux actuel de pollution industrielle.

Avec 500 gigatonnes de soufre relâchées en quelques secondes, l'impact de Chicxulub fut autrement plus percutant qu'une longue crise volcanique. Suite au brasier initial, la chute de la température atmosphérique aurait donc pu atteindre 10 °C, ce qui correspond à deux fois la baisse de température lors de nos récentes périodes glaciaires (5 °C). Affectant d'abord l'atmosphère, ce coup de froid se transmet ensuite aux eaux marines de surface.

En a-t-on des preuves ?

Oui. Dans les couches sédimentaires juste au-dessus de la couche KT, il suffit de regarder quelles espèces de plancton rescapées repeuplent les eaux marines. Sur le site d'El Kef en Tunisie, quasi tropical à l'époque (27° N), on ne trouve plus que des espèces boréales, lesquelles se sont propagées vers le sud dans des eaux devenues beaucoup plus froides. Elles occupent en exclusivité une dizaine de centimètres d'épaisseur de sédiments, ce qui correspond à un intervalle de temps de près de 2 000 ans…

Apparemment, le voile d'aérosols sulfatés soulevés par l'impact aurait stagné très longtemps dans la haute atmosphère, ou bien alors déclenché d'autres effets en chaîne qui ont rendu le refroidissement durable. Dans la basse atmosphère en revanche, on peut penser que les aérosols ont été lavés et précipités au sol assez rapidement par les pluies, en une durée de quelques mois à quelques années, ce qui a déclenché au passage un autre effet pervers.

Pour la biosphère déjà ravagée, ces pluies sont en effet une très mauvaise affaire, car ce sont des pluies acides. Déjà, la violence de l'impact a dû passablement choquer l'atmosphère terrestre, au point qu'une grande quantité d'azote s'y serait oxydé pour se combiner à la vapeur d'eau et former, selon les calculs, plusieurs milliards de tonnes d'acide nitrique. Le lessivage du soufre y ajoute une quantité équivalente d'acide sulfurique, et les pluies vont rester intensément acides durant plusieurs mois à plusieurs années. Elles vont ruisseler sur la terre ferme, et elles vont pleuvoir et se décharger dans les océans, acidifiant les eaux de surface et ravageant le peu de plancton qui reste.

En a-t-on, là aussi, des preuves ?

De nouveau, oui. La concentration de métaux lourds comme le nickel, que l'on trouve dans les sédiments postérieurs à l'impact, trahit l'attaque des roches continentales sous le ruissellement des pluies acides – attaque qui a libéré leurs ions métalliques. Au microscope, on voit également que certains cristaux sont rongés, comme sous le coup d'une gravure à l'eau-forte.

Nous verrons plus loin dans cet ouvrage que la crise climatique actuelle, avec l'augmentation du CO_2 dans l'atmosphère et sa transformation en acide carbonique dans les océans, inhibe aujourd'hui le développement des coquilles calcaires chez les planctons et les mollusques, et menace dangereusement la biosphère marine. Le peu de plancton recensé au terme de la crise KT est une illustration catastrophique du processus, lequel fut aggravé par l'obscurité provisoire et l'arrêt de la photosynthèse, au point que les géologues qui examinent les sédiments de l'époque, et y constatent une quasi-absence de vie, parlent de *Strangelove Ocean* (« océan Folamour »), en clin d'œil au film de Stanley Kubrick qui décrit le démarrage d'une guerre nucléaire.

Victimes et survivants

Vu la funeste liste de catastrophes que nous venons d'évoquer, on peut s'étonner qu'il y ait eu des survivants. Mais il y en a eu, et toutes les espèces animales et végétales qui peuplent aujourd'hui la Terre en sont la preuve. Elles descendent toutes d'ancêtres qui ont survécu au désastre. L'ancêtre de l'homme, en particulier, était un petit mammifère quadrupède qui devait ressembler peu ou prou à un rat ou à un écureuil. Comme on n'a pas découvert les fossiles de toutes les espèces rescapées et que l'on a une vision encore très imparfaite de notre arbre généalogique (ou arbre *phylogénique* en l'occurrence), on ne mettra sans doute jamais la main sur un fossile de notre ancêtre direct, mais le petit mammifère *Purgatorius*, dont on a trouvé les restes dans les sédiments du Montana, nous en donne un portrait approximatif : nous le rencontrerons dans le prochain chapitre.

www.frenchpdf.com



Dromæosauridé du Crétacé supérieur (maquette exposée au Muséum d'histoire naturelle d'Aix-en-Provence). Hormis la branche des oiseaux, qui compta quelques rescapés, la grande famille des dinosaures fut exterminée lors de l'impact de Chicxulub, il y a 66 millions d'années. (© C. Frankel.)

Cela étant, quelles sont les espèces qui ont succombé à l'impact ; lesquelles ont au contraire survécu ; et pourquoi ?

N'en déplaise aux adeptes d'un sens logique et « moral », voire divin, de l'évolution – qui justifierait notre position dominante au sommet du monde vivant –, ce ne furent pas les espèces les plus « méritantes » qui se sont tirées de ce mauvais pas grâce à leur force ou à leur capacité d'adaptation. Au contraire, il valait mieux ne pas être grand, dominant et sophistiqué pour prétendre survivre.

En effet, le premier constat qu'ont dressé les recenseurs de fossiles, c'est que tous les animaux pesant plus de 25 kilogrammes ont été systématiquement exterminés. L'immense majorité des dinosaures dépassaient ce poids « couperet » et font partie des victimes. Tous les grands reptiles marins – mosasaures et plésiosaures en tête – disparaissent de même, ainsi que les grands reptiles volants.

Les mammifères, qui sont à l'époque petits, comptent en revanche un bon nombre de survivants : près de 50 % des espèces passent à travers la crise (tout en ayant certainement essuyé elles aussi de nombreuses pertes, sans compter les autres 50 % qui furent entièrement exterminées). Survivent également de petits reptiles, de petits amphibiens, de petits poissons.

En quoi la petite taille pouvait-elle représenter un atout majeur pour survivre ? On ne peut se livrer qu'à des suppositions, mais deux mécanismes viennent à l'esprit : l'alimentation et la reproduction.

Il faut imaginer qu'au moment de l'impact et dans les jours qui ont suivi, toutes les espèces sont touchées et toutes les populations décimées à des degrés divers, mais que toutes comptent une certaine proportion de survivants. C'est la suite qui va décider de leur sort.

Pour continuer à survivre, les individus doivent parvenir à se nourrir. Et pour que leur espèce perdure, ils doivent pouvoir ensuite se reproduire. Or dans les deux cas, directement et indirectement, la taille est un facteur clé.

Pour l'alimentation, c'est évident. Un gros animal a besoin d'ingurgiter plus de nourriture pour survivre qu'un animal plus petit. À un moment où la destruction de l'écosystème limite fortement les ressources disponibles, les plus gros sont les plus mal lotis : pour un dinosaure qui a besoin de son quintal de plantes vertes par jour, c'est la disette. Un insecte ou un petit mammifère a plus de chance de trouver les quelques milligrammes ou grammes d'aliments quotidiens nécessaires à sa survie.

Le second challenge, c'est la reproduction. Les gros animaux sont moins nombreux au départ que les petits, car ils ont besoin individuellement de plus d'espace pour se nourrir et qu'en sus, un trop grand nombre détruirait leur environnement : une autorégulation se met en place, qui veille à cet équilibre. À partir du moment où une catastrophe décime les populations, et que leur habitat est en outre fragmenté par des feux de forêt et autres ravages, le peu de rescapés d'une grosse espèce auront beaucoup plus de mal à se reconnecter pour se reproduire que ceux beaucoup plus nombreux d'une espèce de petite taille. Sans compter que les petits animaux ont des temps de gestation plus courts et des portées plus nombreuses, en règle générale, que les gros animaux, et peuvent retrouver plus rapidement une densité de population confortable pour assurer leur pérennité, si les ressources alimentaires l'autorisent.

Avec le double handicap de leur alimentation et de leur reproduction, on comprend mieux, comme l'a constaté Dale

www.frenchpdf.com

Russell, que toutes les espèces de gros animaux aient disparu lors du drame.

Et les crocodiles alors ? aura soin de remarquer le lecteur attentif. En fait, si certains crocodiliens ont bien traversé la crise, ce ne furent que des espèces naines : les gros crocodiles, eux, et notamment les crocodiles marins, ont bel et bien été exterminés. Ce n'est que plus tard, lors de la reprise des affaires courantes de l'évolution, que les minicrocodiles rescapés ont eu l'opportunité de se diversifier en espèces plus grosses pour occuper les niches écologiques laissées vacantes, et être là aujourd'hui. Même constat pour les grands mammifères actuels, de l'éléphant à la baleine : tous descendent d'ancêtres éloignés qui ne pesaient pas plus de 25 kilogrammes au stade adulte lorsque l'astéroïde a frappé, et n'ont évolué en formes massives que bien plus tard.

On retrouvera ce handicap de la grande taille dans une extinction beaucoup plus récente, à savoir la première phase de l'extinction actuelle déclenchée par les hommes : le massacre de la mégafaune – mammouths, mastodontes et autre paresseux géants – au sortir du dernier âge glaciaire (voir chapitre 4). Et si c'est l'être humain qui s'est substitué à l'astéroïde dans ce cas particulier, on peut penser que certains des inconvénients d'une taille trop grande ont joué de la même façon : effondrement de l'espèce par manque de reproduction, lorsque la population est passée sous un seuil critique, avec pareillement un temps de gestation trop long pour que les rescapés puissent repeupler leurs effectifs avant d'être massacrés à leur tour.

Outre ce facteur taille, qui a pesé lourd dans la balance, le type d'écosystème a également affecté les chances de survie des différentes espèces. On s'aperçoit ainsi que les animaux d'eau douce tirent mieux leur épingle du jeu que les animaux marins, par exemple. La grande différence tient au fait que la chaîne alimentaire des océans est classique, basée sur la production primaire de petits êtres photosynthétiques – le plancton – qui soutiennent toute la pyramide alimentaire des espèces plus grosses. Coupez la lumière et le plancton s'éteint, entraînant dans sa chute la pyramide entière.

L'écosystème d'eau douce, en revanche, ne dépend pas d'une production primaire, malgré quelques algues et mousses ici et là, mais repose sur le recyclage des détritus : tout ce qui meurt et tombe dans la rivière, comme le savent bien les pêcheurs qui mettent sur leur hameçon une mouche, un ver de terre ou une sauterelle, un grain de maïs ou même une cerise, bref tout ce qui tombe à l'eau depuis la berge ou qui est apporté par le vent. Nul doute qu'au lendemain de l'impact, les rivières ont dû être de véritables caniveaux, charriant une abondance de cadavres et de matière organique.

Le lecteur attentif aura soin de lever le doigt pour rappeler qu'il y a quatre pages à peine, on faisait état de pluies acides : cette eau aurait dû se rassembler dans les rivières et autres plans d'eau douce, condamnant un écosystème que nous présentons maintenant comme un refuge. Cette vulnérabilité à l'acide ne coule pas de source, toutefois, car les abords de nombreux cours d'eau sont calcaires, donc basiques, et peuvent servir de tampon pour neutraliser le caractère acide des eaux de ruissellement, ce qui n'est pas le cas des océans dont la surface est directement exposée à la pluie sulfurique.

La chance des mammifères

Hormis les animaux d'eau douce, l'autre groupe qui a connu un taux de survie respectable avec 50 % d'espèces rescapées est, nous l'avons dit, celui des mammifères. On a vu que leur petite taille a certainement pesé dans la balance. Face aux dinosaures, comme ils ne faisaient pas le poids, les mammifères s'étaient faits le plus discret possible et sortaient en l'occurrence la nuit pour glaner leur pitance, lorsque les dinosaures dormaient.

Ce régime nocturne est le deuxième coup de chance des mammifères. Leur adaptation à l'obscurité et au froid – à commencer par leurs poils et leur sang chaud – joua en leur faveur au lendemain de l'impact, lorsque le voile de poussière et de suie enveloppa la Terre pour la plonger dans une interminable nuit. Alors que les quelques dinosaures rescapés, aveugles et frigorifiés, se cognaient contre les moignons d'arbres calcinés à la recherche d'une improbable nourriture, les mammifères aux grands yeux n'ont eu aucun mal à naviguer et à collecter le peu d'aliments dont ils avaient besoin.

Le troisième avantage dont ont bénéficié les mammifères, ce fut leur habitat : un grand nombre d'espèces vivaient dans des terriers – c'est encore le cas aujourd'hui. Or les terriers, hormis leur rôle de cachette, procurent une merveilleuse isolation thermique contre les sautes de température du milieu extérieur, tant les coups de froid que les coups de chaud. Lors d'une crise qui vit se succéder l'effet rôtissoire des retombées d'éjectas, puis l'effet congélateur du voile obscurcissant, il fut bien agréable et salutaire de se blottir douillettement au fond du terrier pour y attendre la fin des hostilités.

Enfin un quatrième avantage, et non le moindre, concerne le régime alimentaire des mammifères, que l'on peut qualifier d'omnivore pour nombre d'entre eux. Il s'agit d'un fabuleux avantage, procuré par une dentition tout à fait particulière combinant incisives coupantes et molaires broyeuses à tout faire. À la différence des dinosaures hautement spécialisés – chaque espèce herbivore s'étant adaptée à un certain type de végétation qui va lui faire cruellement défaut après l'impact – le petit mammifère omnivore se contente de ce qu'il trouve : graine ou tubercule enfoui, cuisse d'amphibien rôtie, tendrons de dinosaures, n'importe quoi fait l'affaire. C'est le triomphe de l'opportunisme sur la spécialisation à outrance d'animaux remarquablement adaptés… à un monde qui n'existe plus.

www.frenchpdf.com

À ceux qui croyaient les dinosaures inadaptés à un monde devenu trop complexe – un monde promis aux êtres supérieurs que nous sommes – on peut s'amuser à rétorquer qu'ils étaient devenus en fait trop sophistiqués, et que la roue de la fortune leur a préféré une bande de trouillards nocturnes, pas très performants, mais pouvant se contenter de peu. C'est cet improbable casting de « losers », cherchant surtout à ne pas se faire remarquer, qui fut sélectionné pour revenir en deuxième semaine et poursuivre l'aventure.

1.

Environ 700 espèces de dinosaures ont été recensées à partir de leurs fossiles (chiffres de 2015), mais la majorité resterait encore à découvrir, d'où l'estimation de plusieurs milliers d'espèces.

2.

Les noms Primaire, Secondaire et Tertiaire sont aujourd'hui tombés en désuétude avec un retour aux termes Paléozoïque (ère des animaux anciens), Mésozoïque (ère des animaux moyens) et Cénozoïque (ère des animaux récents).

3.

Par exemple, les sédiments de Dinosaur Park au Canada, datés de 77 à 75 millions d'années, semblaient receler plus d'espèces fossiles de dinosaures que ceux de Hell's Creek dans le Montana qui leur sont postérieurs (68 à 66 millions d'années environ), d'où l'impression d'un déclin. De nouvelles découvertes ont mis à mal cette interprétation hâtive (voir WANG S. et DODSON P., « Estimating the diversity of dinosaurs », *PNAS*, 2006).

4.

Le terme Tertiaire est tombé en désuétude, on l'a déjà dit, les géologues ayant retenu les termes de Cénozoïque pour la nouvelle ère, et de Paléogène pour sa première subdivision. Comme son symbole s'écrit « Pg », on parle désormais de frontière Crétacé/Paléogène et donc de couche KPg. Dans ce livre, je continuerai néanmoins à l'appeler couche KT, puisque c'est sous ce sigle qu'elle est entrée dans l'histoire.

5.

Le chercheur allemand Otto Schindewolf (1896-1971) avait déjà évoqué en 1963 une explosion de supernova pour tenter d'expliquer une autre crise du monde vivant : celle de la fin du Permien.

6.

Environ 1 chance sur 7. Les bassins océaniques recouvrent les deux tiers du globe, et 20 % de ceux de l'époque ont disparu, remplacés par une croûte plus jeune. C'est donc environ 1/7 de la surface terrestre (2/3 × 1/5) qui a été renouvelée depuis la fin des dinosaures.

7.

À l'époque, l'âge obtenu et cité était de 65 millions d'années. Depuis lors, des recalibrations successives de l'échelle des temps géologiques (suite notamment à une meilleure connaissance des taux de désintégration des atomes radioactifs) ont repoussé l'âge de la fin du Crétacé, de la couche KT et du cratère de Chicxulub à 65,5, puis à 66,2 millions d'années.

8.

Voir SCHULTE P. *et al.*, « The Chicxulub asteroid impact and mass extinction at the Cretaceous-Paleocene boundary », *Science*, 327, 2010, p. 1214-1218 ; et aussi FRANKEL C., « Pas de deuxième impact tueur de dinosaures », *Ciel et Espace*, 477, février 2010, p. 36-39.

9.

La fourchette de vitesses possibles de collision est assez large (entre 12 km/s pour un astéroïde lent et 72 km/s pour une comète rapide), mais avec une haute probabilité que ce soit un astéroïde de vitesse relative moyenne (20 km/s).

10.

L'énergie d'un impact n'est pas proportionnelle au diamètre du cratère, mais à son volume (le cube du diamètre). Un diamètre deux fois plus petit correspond donc à un impact environ huit fois moins énergétique.

www.frenchpdf.com

3

L’essor des mammifères

La biosphère est longtemps restée sonnée après l’impact de l’astéroïde. L’océan « Folamour », vide de vie, a mis plusieurs milliers d’années à récupérer, à en croire la pauvreté en fossiles des premiers centimètres de boue qui se sont déposés après la crise.

Quelques rares espèces de plancton se sont rétablies en quelques siècles seulement, notamment celles les mieux adaptées au froid, ainsi que celles qui bâtissaient leur carapace en silice plutôt qu’en calcaire, avantage indéniable dans une eau devenue acide. Certains mollusques côtiers se sont également remis promptement, si on peut appeler promptitude une lacune de plusieurs siècles avant leur réapparition dans le registre fossile. Au large des côtes, en pleine mer, ce fut beaucoup plus long, peut-être parce que les eaux de surface y restèrent acides plus longtemps, sans contact avec les sédiments côtiers – calcaires et basiques – capables de les neutraliser. Cet écosystème de haute mer (*pélagique*, disent les biologistes) resta dépeuplé près de deux *millions* d’années.

Du reste, toutes les régions du globe n’étaient pas logées à la même enseigne. Les eaux polaires connurent moins la crise que les eaux tropicales, pour la bonne raison que leurs espèces animales étaient déjà habituées au froid, ainsi qu’aux longues périodes hivernales d’obscurité. Nombre de planctons des hautes latitudes, nous l’avons vu, ont même profité du refroidissement global des océans pour descendre vers l’équateur où ils restèrent longtemps en position de monopole.

Les espèces naines tirent également leur épingle du jeu et on les retrouve un peu partout. C’est une adaptation bien connue des biologistes : lorsque la nourriture vient à manquer ou que l’aire de l’habitat rétrécit, ce sont les petites espèces peu gourmandes en ressources qui sont favorisées. On observe ce nanisme dans les îles – un exemple récent nous en est offert par les éléphants nains de Sicile et de Malte, qui ne dépassaient pas un mètre de hauteur – ainsi que dans les lacs de haute montagne à la nourriture restreinte, où il est connu que les pêcheurs ne capturent que de petites truites.

Sur la terre ferme, la récupération de l’écosystème se déroule également au ralenti. Juste au-dessus de la couche KT, les premiers 30 à 40 centimètres de sédiments continentaux – correspondant à un intervalle de temps de 30 000 à 40 000 ans – ne contiennent pratiquement que des spores de fougères. Cette végétation opportuniste, bien connue pour être la première à recoloniser la terre après les grandes catastrophes comme les feux de forêt, ne va partager la scène qu’avec quelques arbres : des fougères arborescentes d’abord, suivies par des conifères et autres gymnospermes descendus des régions polaires. Ce n’est qu’au bout d’un million d’années que l’on voit réapparaître les arbres à fleurs (angiospermes), sans doute parce que leur reproduction dépend d’insectes pollinisateurs et que ces derniers furent décimés eux aussi lors de la crise.

Ce nouvel écosystème qui se met en place, considérablement élagué, donne sa chance à un nouveau casting d’acteurs qui a désormais le champ libre pour écrire son histoire.

Les trente glorieuses

On appelle cette ère nouvelle, qui débute au lendemain du désastre, le *Cénozoïque* [1] (« ère des animaux récents » en grec). Elle deviendra celle des mammifères et des oiseaux, les deux groupes entreprenant une ascension fulgurante au détriment des amphibiens et des reptiles qui vont désormais jouer les seconds rôles.

Trente millions d’années durant – les « trente glorieuses », est-on tenté de dire – l’écosystème se rebâtit dans des conditions particulièrement avantageuses. Comme après une guerre, tout est à refaire et les opportunités sont nombreuses. L’extermination de tant d’espèces, suite à l’impact de l’astéroïde, a libéré nombre de niches écologiques dans les mers, sur terre et dans les airs, et les survivants peuvent se partager le territoire, sans la menace des dinosaures et autres grands reptiles qui verrouillaient autrefois tous les rôles principaux.

Les mammifères notamment voient deux groupes s’épanouir : les marsupiaux (dont les nouveau-nés sont portés dans la poche ventrale de leur mère) ; et bien sûr les placentaires qui sont dominants aujourd’hui, parmi lesquels les premiers quadrupèdes à sabots – ancêtres des chevaux, porcs, chameaux et autres rhinocéros – et les premiers primates qui ont des allures de lémuriens et où pointe notre lointain ancêtre. À ce sujet, comme les os de ces petits mammifères se conservent mal, les fossiles en bon état sont rarissimes et la grande majorité des espèces de l’époque manque encore à notre inventaire, de sorte que nous ne saurons peut-être jamais quel fut notre ancêtre direct (voir encadré).

www.frenchpdf.com

Portrait d'ancêtre : le *Purgatorius*

L'un des petits mammifères qui a survécu à l'impact de l'astéroïde, il y a 66 millions d'années, et dont on retrouve des fragments fossiles juste après la crise (notamment en Amérique du Nord), est le *Purgatorius*. Il s'agit vraisemblablement de l'une des premières espèces à se détacher des autres lignées de mammifères pour fonder le groupe des primates, lequel accouchera à terme des lémuriens, singes, grands singes et *in fine* du genre humain.



Passé à travers la crise de la fin du Crétacé, le petit mammifère *Purgatorius* fait figure d'ancêtre possible des primates et *in fine* du genre humain. (© Patrick Lynch/Yale University.)

Ce mammifère, que l'on peut donc considérer comme notre ancêtre ou qui en est proche, ne doit pas son nom au fait qu'il a failli basculer dans l'enfer de l'impact, mais parce qu'on a découvert ses premiers restes fossiles sur le lieu-dit Purgatory Hill (Colline du Purgatoire), un endroit infesté de moustiques où les paléontologues ont beaucoup souffert. Sur ce site du Montana, les restes du petit mammifère – qui devait mesurer une quinzaine de centimètres pour un poids inférieur à 50 grammes – se sont longtemps limités à quelques dents et fragments de mâchoire. En 2012, la découverte et l'étude d'osselets correspondant à l'articulation de sa cheville suggèrent que l'animal était arboricole, et d'après la forme de ses dents qu'il était omnivore : un peu carnivore, un peu insectivore et certainement fructivore, d'où l'importance de grimper aux arbres pour se nourrir de fruits.

Le portrait-robot de l'animal, basé sur le peu d'ossements en notre possession, suggère une morphologie à mi-chemin entre celle de la musaraigne et celle de l'écureuil.

Toutes ces nouvelles espèces animales, répétons-le, sont de petite taille au départ – on dirait des maquettes à échelle réduite de nos espèces actuelles – avant d'évoluer vers de plus gros calibres dès que les conditions le permettent. Une partie de ces animaux habitent les forêts qui peu à peu se reconstituent, forêts bien différentes de celles du Crétacé puisque apparaissent les premiers palmiers et cactus, et que se développent de nombreuses espèces à feuilles caduques, comme les cyprès chauves en zones humides, et en zones plus sèches les lauriers, bouleaux, ainsi que les myrtacées qui donneront à terme eucalyptus et consorts. Se développent aussi les savanes et les prairies : si les graminées existaient déjà au temps des dinosaures, elles connaissent un bel essor qui va de pair avec celui des mammifères « brouteurs ». Apparaissent enfin des lianes comme la vigne dont on trouve la première empreinte fossile dans les calcaires paléocènes de Champagne : tout un symbole !

Les reptiles rescapés de l'astéroïde ont également de beaux jours devant eux, vu le chaud climat qui s'installe. De nombreuses espèces de crocodiles, tortues, lézards, varans et serpents, passées au travers de la crise parce qu'elles étaient petites, s'épanouissent. Mais il est une branche en particulier qui s'envole littéralement : c'est celle des oiseaux.

On sait aujourd'hui que les oiseaux descendent des dinosaures : ils s'en étaient déjà bien détachés avant la crise, au point de mériter une classification à part. À la différence de leurs encombrants cousins, ils furent relativement nombreux à survivre à l'astéroïde, puisqu'on estime à 50 % le nombre d'espèces aviennes rescapées : un taux de survie comparable à celui des mammifères. C'est d'ailleurs insolite, car les oiseaux paraissent de nos jours assez fragiles vis-à-vis des problèmes de déforestation et de pollution atmosphérique. Les experts supposent donc que ce sont les espèces aux mœurs aquatiques, inféodées aux estuaires et aux marais, qui sont passées à travers la crise, à l'instar des amphibiens et autres membres d'un écosystème qui ne dépendait pas de la chaîne alimentaire classique. On peut aussi imaginer que leur grande mobilité aérienne leur a permis de migrer rapidement, à tire d'aile, des régions les plus touchées vers d'éventuels refuges.

Toujours est-il qu'à partir de leur groupe de survivants, les oiseaux connaissent un essor remarquable et occupent

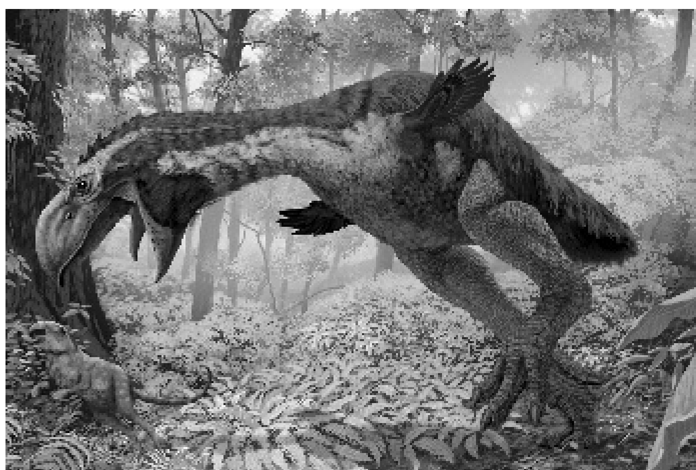
www.frenchpdf.com

nombre de niches ayant autrefois appartenu aux dinosaures. On a coutume d'appeler « ère des mammifères » l'ère qui suit l'impact, avec un touchant esprit de clan, mais force est de reconnaître qu'aujourd'hui les espèces d'oiseaux sont deux fois plus nombreuses que celles des mammifères (10 000 contre 5 000) et que l'on devrait objectivement l'appeler « ère des oiseaux ».

D'ailleurs, les oiseaux ont longtemps tenu tête aux mammifères au sommet de la hiérarchie animale. Dès que la stabilisation de l'écosystème a permis un accroissement des tailles, certaines espèces ont acquis des dimensions que les dinosaures eux-mêmes auraient enviées, tel l'imposant *Gastornis* dont les premiers fossiles furent découverts dans les sédiments argileux de Meudon, près de Paris. Cet oiseau à grosse tête et large bec aplati, rappelant celui du toucan, mesurait deux mètres de haut. Plus effrayants encore étaient les « oiseaux de terreur » d'Amérique du Sud – chasseurs carnivores – dont certaines espèces se dressaient sur trois mètres.

Du nanisme au gigantisme, l'évolution joua sur les deux tableaux, ce qui peut surprendre. En fait, ces tendances ne sont pas contradictoires, mais complémentaires. Là où la nourriture est limitée et les prédateurs absents, il est avantageux de rester petit. Là où les ressources sont plus amples et la prédation se développe, il fait bon grandir en taille pour repousser l'agresseur, sauf que celui-ci évolue dans le même sens, d'où une course vers le gigantisme.

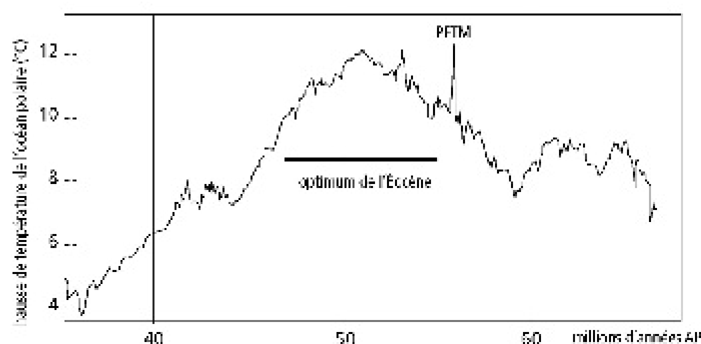
La nouvelle ère du monde vivant est en tout cas bien lancée, et les stigmates de l'impact effacés par 10 millions d'années de récupération, lorsqu'un nouvel événement vient frapper la biosphère, événement qui nous intéresse au premier chef puisqu'il préfigure la crise à laquelle l'humanité est aujourd'hui confrontée. Pour des raisons encore obscures et sans préavis se déclare, il y a 56 millions d'années, un réchauffement climatique hors du commun.



Des oiseaux géants, tant herbivores que carnivores qui remplirent la niche écologique laissée vacante par la disparition des dinosaures. (© Jaime Chirinos/Science Photo Library Cosmos.)

Réchauffement climatique : un mystérieux précédent

Connu sous le nom de « maximum thermique du Paléocène-Éocène » (ou PETM, son acronyme en anglais), cet événement insolite a été identifié en 1991 par deux chercheurs de l'université de Californie – le Néo-Zélandais James Kennett et l'Américain Lowell Stott – lors d'une étude routinière de sédiments marins forés au large de l'Antarctique. On savait déjà qu'il y a 56 millions d'années, une extinction avait frappé les protozoaires du fond marin (les *foraminifères benthiques*), près de la moitié des espèces ayant soudainement disparu.



www.frenchpdf.com

Maximum thermique du passage Paléocène/Éocène (PETM)

Fluctuations des températures de la Terre (représentées par celles des océans polaires) en degrés Celsius au-dessus des valeurs actuelles, entre 70 millions d'années (à droite) et 35 millions d'années (à gauche) avant le présent. Sur la « bosse » des températures élevées de l'Éocène se dégage un pic brutal de réchauffement, il y a 55,5 millions d'années (PETM).

Mais ce que l'étude des carottes a révélé, c'est que cette perturbation du monde marin est liée à un réchauffement brutal des eaux, souligné entre autres par l'apparition au large de l'Antarctique de planctons d'origine tropicale.

Les analyses chimiques des carottes et de leurs microfossiles montrent d'autre part que le réchauffement fut accompagné d'une injection massive de carbone dans les océans et dans l'atmosphère, un carbone de type léger – le carbone 12 (^{12}C) – qui est caractéristique de la matière organique, tels le charbon ou le méthane (voir encadré). Si aujourd'hui la hausse de ce carbone léger dans l'atmosphère est la preuve que l'homme brûle charbon, pétrole et gaz naturel, son dégazage à la frontière Paléocène/Éocène s'est évidemment déroulé sans notre concours.

On ne sait pas d'où est sorti ce carbone à l'époque. Certainement pas du volcanisme – en tout cas pas de manière directe – car dans ce cas le carbone proviendrait du manteau terrestre et ne serait pas enrichi en son isotope léger ^{12}C, signature au contraire de la matière organique de surface. Les chercheurs penchent plutôt pour la libération massive de carbone organique à partir de gisements fossiles qui auraient été déstabilisés. Certains évoquent le pergélisol (*permafrost* en anglais) des hautes latitudes où des strates de tourbières gelées auraient fondu. Néanmoins, sous le climat clément du Paléocène, comment de tels sols gelés pouvaient-ils exister, et pourquoi auraient-ils soudainement fondu ?

D'autres chercheurs évoquent des gisements sous-marins où, dans la froideur des grands fonds, la matière organique décomposée peut se figer en glaces (les chimistes les appellent *clathrates*), riches en méthane. Mais là aussi, on bute sur le mécanisme qui aurait soudainement fait fondre ces glaces et libéré massivement le méthane dans l'océan, puis dans l'atmosphère où son redoutable effet de serre aurait fait bondir la température.

La tentation est grande, en prenant exemple sur l'impact cosmique de la fin du Crétacé et l'effet qu'il a eu sur l'environnement en frappant au mauvais endroit, d'invoquer un mécanisme similaire dans le réchauffement brutal de la fin du Paléocène : un astéroïde ou une comète aurait frappé le plateau continental là où gisaient des glaces sous-marines de méthane, relâchant leur gaz dans l'environnement.

Mais ce n'est pas la solution. D'une part, on n'a pas le moindre indice d'impact à la fin du Paléocène. Et surtout, les sédiments marins et leurs rapports isotopiques d'oxygène et de carbone éclairent la séquence des événements de façon très précise : le début du réchauffement de l'eau et de l'atmosphère a précédé le dégazage massif de carbone fossile. Dans l'hypothèse d'un impact, c'est au contraire le dégazage (lors de la collision) qui aurait dû précéder le réchauffement.

En se penchant plus avant sur la précision quasi millimétrique des informations contenues dans les sédiments, on peut même aller plus loin : la perturbation des océans commence par un premier réchauffement estimé à 2 °C ; puis, en un temps de quelques siècles à quelques millénaires tout au plus, a lieu le dégazage massif de carbone organique qui entraîne un réchauffement supplémentaire de 4 °C. On cherche toujours la cause du premier réchauffement – le détonateur – qui aurait déclenché la fonte présumée des clathrates de méthane et déchaîné son effet de serre amplificateur.

À la différence du réchauffement final, il n'est pas exclu que le réchauffement initial – le détonateur – ait été volcanique. L'ouverture de rifts entre le Canada et l'Europe, séparant les continents pour mettre en place l'Atlantique Nord, date bien de cette époque, mais une hausse de température aussi unique et rapide, causée par des éruptions somme toute banales et étirées dans le temps, laisse quelque peu sceptique. On n'a pas constaté de réchauffement important dans le cas des éruptions bien plus volumineuses des trapps du Deccan, lors de la fin des dinosaures. Alors pourquoi cette fois-ci ?

En tout cas, il y a là matière à réflexion pour notre civilisation. La séquence des événements illustre bien l'épée de Damoclès suspendue au-dessus de nos têtes, à savoir la possibilité qu'une augmentation de température, que l'on croit limitée à un ou deux degrés, puisse servir de détonateur pour en déclencher une autre, encore plus importante. Cet effet amplificateur, que l'on appelle « cercle vicieux » ou « effet boule de neige » dans le langage courant et « rétroaction positive » en langage scientifique, est le grand danger qui guette notre civilisation. Aujourd'hui, tout comme à la fin du Paléocène, il y a d'énormes réserves de gaz à effet de serre congelées dans le fond marin, et même sur la terre ferme, dans le pergélisol des hautes latitudes. C'est avec une telle boîte de Pandore que nous jouons actuellement[2].

Que le réchauffement brutal de la fin du Paléocène ne se soit pas accompagné d'une dramatique vague d'extinctions ne doit pas nous endormir. À l'époque, ce réchauffement fut un problème isolé dans un environnement autrement stable, au sein duquel les espèces ont pu se déplacer rapidement pour se réfugier aux latitudes les plus fraîches et survivre, alors que d'autres ont pu évoluer sur place en formes mieux adaptées à la nouvelle donne. Aujourd'hui, avec un habitat morcelé par l'agriculture, l'urbanisme et la déforestation, une telle mobilité est loin

www.frenchpdf.com

d'être assurée, et donc de nombreuses espèces pourraient être acculées à l'extinction.

Les changements subis par la faune de l'époque ne sont toutefois pas anodins, comme l'atteste l'exceptionnel site fossilifère de Bighorn Basin dans le Wyoming. Moins de 10 000 ans après le début de la crise y apparaissent en effet les ossements de toute une colonie de nouveaux mammifères : des ongulés à nombre impair de doigts (périssodactyles), parmi lesquels les ancêtres des chevaux ; les premiers ongulés américains à nombre pair de doigts (artiodactyles), dont descendent entre autres nos bovidés, cervidés et suidés ; des primates ; et des carnivores ressemblant à des hyènes. Tous sont de petite taille, en adaptation au brusque réchauffement.

Bien sûr, ces nouvelles espèces ne sont pas nées par génération spontanée : elles proviennent apparemment de discrets mais prolifiques sites de diversification animale quelque part en Mongolie ou en Chine du Sud. On ne sait pas pourquoi le réchauffement climatique les a délogées de leurs régions natales, mais elles en ont profité pour envahir l'Asie, l'Europe et l'Amérique du Nord, et imposer un virage radical dans l'équilibre de l'écosystème et le cours de l'évolution sur Terre.

Le réchauffement exceptionnel de la fin du Paléocène et son changement de casting animal et végétal sont bouclés en moins de 200 000 ans. Les choses vont alors se calmer et l'écosystème se stabiliser : une période Éocène qui se distingue entre autres par les plus vastes forêts tropicales et subtropicales que la Terre ait jamais connues.

Vingt millions d'années durant, ce jardin d'Éden va perdurer. Mais rien n'est jamais acquis sur Terre, et après le chaud climat qui a marqué la première mi-temps de l'ère des mammifères, la seconde mi-temps va être secouée par plusieurs vagues de refroidissement successives qui vont mener au bout du compte à un véritable âge glaciaire.

Ce que nous disent les atomes

Les éléments qui constituent la matière sont caractérisés par le nombre de protons (particules chargées électriquement) que contient leur noyau atomique : par exemple six protons pour le carbone et huit protons pour l'oxygène. En outre, chacun de ces éléments se décline en plusieurs versions de masses différentes – on les appelle *isotopes* – qui dépendent du nombre additionnel de neutrons (particules sans charge électrique) de ce même noyau. Ainsi le carbone, qui compte six protons, peut contenir au choix six, sept ou huit neutrons : en faisant la somme des particules, on parle alors des isotopes carbone 12 (^{12}C), carbone 13 (^{13}C) et carbone 14 (^{14}C). Ce dernier est radioactif et instable, ce qui permet de l'utiliser comme chronomètre pour dater les objets qui le renferment. Quant aux deux isotopes stables, carbone 12 et carbone 13, leurs proportions sur Terre sont d'environ 100 atomes de carbone 12 pour un atome de carbone 13.

Cette proportion, ou rapport isotopique, peut toutefois évoluer lors de processus physiques ou biologiques. En particulier, les organismes qui intègrent du carbone dans leurs cellules par photosynthèse vont préférer la version légère carbone 12, car elle est plus facile à dégager (moins d'énergie à fournir) du milieu ambiant. Il en résulte que les fossiles et microfossiles animaux et végétaux sont enrichis en carbone 12. Cela permet notamment de prouver que le gaz carbonique qui s'accumule aujourd'hui dans l'atmosphère ne vient pas des volcans, par exemple, mais émane de la combustion industrielle de carburants fossiles, car enrichi en ce carbone 12 léger.

Un autre type d'information que l'on peut tirer de ces subtils rapports isotopiques concerne la température du milieu, en s'intéressant cette fois aux isotopes de l'oxygène. Lorsque l'eau de mer s'évapore, ce sont les isotopes les plus légers qui « s'envolent » de préférence, c'est-à-dire les molécules d'eau qui contiennent de l'oxygène 16 (^{16}O) plutôt que de l'oxygène 18 (^{18}O). Du coup, cet oxygène 18 délaissé « dope » l'eau de surface. Mais jusqu'à un certain point : si la température de la mer augmente, il va lui aussi s'évaporer, et la proportion d'oxygène 18 dans l'eau de surface va se mettre à baisser. Comme les planctons et autres formes de vie marine intègrent de l'oxygène dans leurs coquilles, on peut déduire du ratio $^{18}O/^{16}O$ de leurs fossiles la température de l'eau à l'époque de leur formation : ils sont un thermomètre des mers antiques.

Grâce à ces deux remarquables indicateurs que sont le carbone et l'oxygène contenus dans les fossiles, on sait ainsi qu'à la fin du Paléocène, il y a 56 millions d'années, l'eau de mer s'est réchauffée et que, peu après, du carbone d'origine organique (vraisemblablement du méthane) a été relâché en grande quantité dans l'atmosphère et dans les océans.

Après le chaud : le froid !

Si l'homme veut apprendre à gérer sa planète, il doit tout comprendre : comment elle peut se réchauffer, mais aussi comment elle peut se refroidir. Et le moins que l'on puisse dire, c'est que les derniers millions d'années de notre histoire nous offrent un spectaculaire enchaînement de refroidissements, certains brutaux, d'autres plus progressifs, dont les causes sont multiples et variées.

Les paléontologues, qui ont très tôt noté dans les fossiles un revirement de la faune et de la flore du chaud bestiaire de l'Éocène vers des formes moins tropicales et mieux adaptées aux climats tempérés, ont logiquement défini cette transition comme point de départ d'une nouvelle époque géologique qu'ils ont baptisée Oligocène.

www.frenchpdf.com

Il s'agit d'une transition progressive et complexe, et non d'une frontière abrupte, comme la grande extinction de la fin du Crétacé. Cela étant, l'aura de cette dernière marque les esprits, de sorte que nombre de chercheurs et de reporters scientifiques ont voulu y voir un phénomène brutal et spectaculaire, d'autant que la datation de couches fossilifères aux quatre coins du globe était entachée d'imprécisions, voire d'erreurs, et permettait de regrouper en un intervalle de temps aussi court qu'on le voulait des événements qui se sont avérés par la suite séparés par plusieurs millions d'années.

Cette tendance vers le catastrophisme fut exacerbée au début des années 1980 par la découverte dans les couches sédimentaires de cette nouvelle transition d'un peu d'iridium, de quartz choqué, de sphérules et d'oxydes de fer riches en nickel, bref des mêmes preuves d'impact cosmique que celles recensées pour la fin des dinosaures, quoique moins concentrées. Mieux : sur certains sites on pouvait identifier deux couches distinctes de sphérules, séparées par quelques centimètres de sédiments, qui suggéraient non pas un, mais deux impacts cosmiques espacés de quelques dizaines de milliers d'années seulement.

Du reste, il ne fallut pas longtemps pour trouver les cratères responsables : Popigaï en Sibérie, très érodé mais qui exhibe une structure circulaire large de 80 à 90 kilomètres selon les estimations ; et un cratère sous-marin découvert en 1993, enfoui sous les sédiments de Chesapeake Bay au sud de Washington, qui dépasse pour sa part 60 kilomètres de diamètre.

La roche cible vaporisée par les impacts correspond bien chimiquement à la composition des sphérules retrouvées dans les sédiments de la fin de l'Éocène, et l'âge concorde également : environ 35,5 millions d'années, tant pour les deux impacts que pour les bancs de sphérules.

Les géologues pensaient bien détenir là les responsables des extinctions en cascade de la fin de l'Éocène et les refroidissements du climat associés. Emmenés par Walter et Luis Alvarez en personne, les chasseurs d'impacts pouvaient même rêver d'une généralisation triomphale de leur thèse, à savoir que toutes les grandes extinctions du monde animal avaient pour origine des collisions d'astéroïdes et de comètes.

Ils devaient vite déchanter. Il y avait bien là deux beaux impacts – les plus violents recensés depuis le massacre des dinosaures – mais en analysant les fossiles de plancton de part et d'autre des couches témoins d'iridium et de sphérules, on n'observe pas du tout d'effondrement catastrophique des populations marines, comme ce fut le cas pour l'impact du Chicxulub à la fin du Crétacé. Au mieux voit-on quelques fluctuations dans les proportions de différentes espèces de plancton, reflétant des variations de température des eaux océaniques. Mais c'est à peu près tout.

Au contraire, plus les paléontologues ont ratissé le terrain, en milieu continental comme en milieu marin, plus ils ont dû revoir leur copie et abandonner le concept d'extinctions catastrophiques regroupées à la fin de l'Éocène, pour lui substituer celui d'un enchaînement beaucoup plus diffus d'extinctions, ventilées sur 7 millions d'années, les mammifères terrestres connaissant une première crise il y a 40 millions d'années, puis les animaux marins il y a 37 millions d'années, et enfin rebelote chez les mammifères terrestres il y a 33 millions d'années.

Et les impacts de Popigaï et Chesapeake dans tout ça ? De manière assez embarrassante, ils surviennent il y a 35 millions d'années, soit entre les crises, quand il ne se passe rien de spectaculaire dans le monde vivant.

Cela ne veut pas dire qu'ils n'ont pas eu d'effet sur le climat, quoique pour l'instant il soit difficile à discerner. Au niveau régional, les impacts ont certainement soufflé les forêts et massacré les animaux à plus d'un millier de kilomètres à la ronde, tant en Sibérie qu'en Amérique du Nord. Mais l'écosystème planétaire dans son ensemble aurait à peine bronché.

S'il faut en tirer une leçon – comme nous l'avons évoqué dans le précédent chapitre – c'est qu'il existe un seuil de violence qu'un impact doit dépasser pour décimer la biosphère, et que ceux de Popigaï et de Chesapeake ne faisaient pas le poids, ou n'avaient pas frappé une cible suffisamment riche en éléments nocifs pour déclencher des nuisances collatérales.

De la même manière, sont hors de cause de grandes éruptions volcaniques en Éthiopie, brandies en parallèle pour expliquer cette transition Éocène/Oligocène. Ces inondations de basalte datent de 30 millions d'années et surviennent donc bien après la bataille, lorsqu'il ne se passe rien de notable dans l'écosystème. Ce manque de synchronisme ne fait d'ailleurs que renforcer l'impression que la plupart des trapps, à l'instar de ceux du Deccan lors de la disparition des dinosaures, n'ont pas d'effet important sur la biosphère.

Changement de faune radical

Si on ne lui trouve pas d'explication simple à première vue, le coup d'envoi des vagues de refroidissement et des extinctions qui les accompagnent a lieu il y a 40 millions d'années : sont sérieusement ébranlés les forêts tropicales, les marécages et les populations d'amphibiens, reptiles et mammifères qui les habitent.

On voit à la forme des feuilles, préservées sous forme fossile dans les sédiments, que la température chute

www.frenchpdf.com

progressivement d'une dizaine de degrés Celsius, ce qui est énorme. Sur les sites fossilifères du Dakota du Nord, par exemple, les plantes tropicales qui constituaient jusqu'alors des forêts vierges pratiquement ininterrompues sont remplacées par des feuillus de plus en plus clairsemés qui pointent non seulement vers un refroidissement général, mais aussi vers des écarts saisonniers de plus en plus marqués et des périodes de sécheresse.

Pas étonnant, dans ces conditions, que les salamandres, crocodiles et tortues d'eau déclinent brusquement aux latitudes tempérées, pour être remplacés par des serpents et des tortues de terre. Pour les mammifères aux mœurs arboricoles, le bilan est particulièrement sévère : en Amérique du Nord, environ un quart des genres de mammifères disparaissent, soit approximativement la moitié des espèces, perte similaire à celle de la fin du Crétacé.

En Europe, où nous connaissions jusqu'alors dans nos forêts un bel essor des primates, ces derniers commencent à se raréfier, de pair avec leur environnement, tandis qu'au sol les brouteurs habitués à des feuilles tropicales et grasses quittent la scène pour être remplacés par de nouveaux « modèles » mieux adaptés aux feuilles et plantes coriaces, à l'instar des paléothères, lointains ancêtres des chevaux.

Si le monde marin subit aussi une extinction progressive d'espèces tropicales à cette époque, c'est surtout deux ou trois millions d'années plus tard, il y a 37 millions d'années environ, que l'on note un véritable chamboulement chez les planctons, ceux des tropiques disparaissant sous le coup d'une invasion de leurs cousins des hautes latitudes, qui profitent du refroidissement général pour descendre vers l'équateur et, mieux adaptés, les évincer.

Le coup de froid est particulièrement insupportable pour les gastéropodes et les bivalves qui perdent plus de 80 % de leurs espèces, et rares sont les familles qui échappent à la crise (on citera les huîtres et les oursins, peu touchés), une crise qui reste à ce jour comme étant le plus grand chamboulement marin depuis la fin des dinosaures, il y a 66 millions d'années.

Après un nouveau répit de trois millions d'années, au cours duquel frappent sans grand dommage les deux astéroïdes de Popigaï et Chesapeake Bay, se déroule le troisième et dernier acte de l'effondrement en cascade des températures et de l'écosystème, il y a 33 millions d'années. Cette fois, même les huîtres et les oursins sont touchés, de même que les planctons et les mollusques, car la chute de température doit être encore plus féroce. Elle l'est en tout cas à l'air libre, sur la terre ferme, où certaines estimations font état de 13 °C perdus en moyenne annuelle, et des écarts saisonniers encore plus marqués, les températures oscillant de près de 25 °C entre été et hiver, alors qu'au temps béni de l'optimum climatique, au début de l'Éocène, la fluctuation saisonnière ne dépassait pas 5 °C.

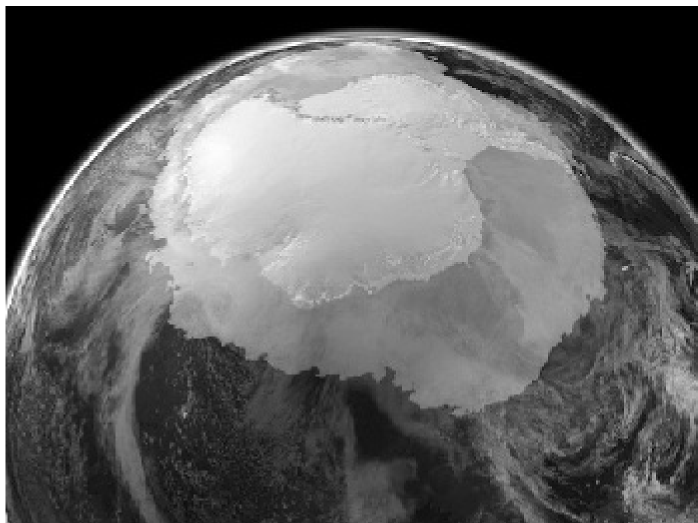
Ce nouveau coup de froid ne semble pas trop affecter l'Amérique du Nord, bien que les brouteurs géants de l'époque – les brontothères – succombent au changement. Peut-être la crise précédente a-t-elle déjà éliminé les espèces les plus fragiles, les survivants étant « immunisés » aux nouveaux coups de froid ? Peut-être aussi la quasi-isolation de l'Amérique empêche-t-elle l'arrivée de concurrents venus d'autres contrées, qui auraient pu détrôner les espèces régionales en difficulté ?

L'Europe connaît en tout cas un sort bien différent, avec tant d'extinctions et de remplacements d'espèces que cette transition a été qualifiée, dès 1910, de « Grande Coupure » par le paléontologue suisse Hans Stehlin. Nombre de mammifères sont frappés, et notamment de nouveau les espèces arboricoles qui disparaissent cette fois-ci complètement d'Europe.

Le changement est d'autant plus marqué qu'un nombre important de mammifères aux origines clairement asiatiques viennent remplacer les espèces déchues, parmi lesquels des rongeurs assez sophistiqués, les ancêtres de nos futurs lapins, et même les prototypes des futurs rhinocéros. Tous sont adaptés au froid et à une végétation coriace. Peut-être leur arrivée massive coïncide-t-elle avec l'assèchement d'un bras de mer peu profond – la mer intérieure de Turgaï – qui séparait antérieurement l'Europe de l'Asie. Peut-être aussi viennent-ils de hauts plateaux liés au soulèvement de l'Himalaya, lieu d'origine qui les aurait rendus mieux adaptés aux écarts de température propres au climat montagnard, par rapport aux mammifères européens habitués à la douceur des plaines.

Toujours est-il qu'en quelques millions d'années, lors de cette crise Éocène-Oligocène en trois temps, la biosphère a fait sa révolution et quitté son cocon tropical pour descendre, marche par marche, vers un monde de plus en plus froid. Il reste à comprendre pourquoi la Terre s'est refroidie de cette façon, à partir du milieu de l'Éocène. Car mieux on comprendra les virements et revirements climatiques du passé, mieux on pourra prétendre prévoir et maîtriser ceux de l'avenir.

www.frenchpdf.com



L'Antarctique vu de l'espace : outre l'effet miroir du continent englacé, sa banquise périphérique augmente d'autant son pouvoir réflecteur pour refroidir la planète. (© NASA.)

Pourquoi la Terre s'est-elle refroidie ?

Pour expliquer la dégringolade des températures, on a vu que les scénarios catastrophes, tels les impacts d'astéroïdes et les grandes éruptions volcaniques, ne sont pas convaincants. Géologues et climatologues invoquent à leur place un autre mécanisme : la tectonique des plaques et la dérive des continents, qui peuvent singulièrement affecter les courants océaniques et, par effet domino, le climat.

Vu la lenteur du processus – les continents s'écartent ou se rapprochent au rythme de quelques centimètres par an – on peut s'étonner qu'il ait pu causer des pulsions de refroidissement relativement brèves, chamboulant l'écosystème sur des intervalles de quelques centaines de milliers d'années ou moins. Mais quand on fait le compte, au rythme moyen de 5 centimètres par an, une centaine de milliers d'années représentent 5 kilomètres de plus ou de moins de séparation entre continents.

C'est finalement assez rapide. Le détroit du pas de Calais, qui raccorde la Manche à la mer du Nord, est large de 30 kilomètres ; le détroit de Gibraltar entre Atlantique et Méditerranée est moitié moins large (15 kilomètres). En d'autres termes, au rythme des mouvements tectoniques, leur fermeture peut s'effectuer en respectivement 600 000 ans et 300 000 ans. L'effet climatique d'un tel changement pourrait d'ailleurs se faire sentir auparavant, avant que la fermeture ne soit complète. À l'inverse, le même raisonnement s'applique à l'ouverture d'un nouveau bras de mer entre continents, qui pourrait affecter le climat au même rythme.

C'est justement l'ouverture d'un détroit qui a la faveur des climatologues pour expliquer le refroidissement de la fin de l'Éocène, ouverture qui aurait modifié les courants marins autour du pôle Sud et isolé l'Antarctique pour le transformer en un réfrigérateur géant. Selon ce scénario, tout peut aller très vite : à partir du moment où l'Antarctique se refroidit et amasse des neiges et des glaciers qui réfléchissent de plus en plus la lumière solaire vers l'espace, un effet « boule de neige » s'enclenche, le froid appelant le froid.

Cette mise en cause de l'Antarctique dans les effondrements climatiques de la transition Éocène/Oligocène ne s'est pas immédiatement imposée. Longtemps on a cru que les premiers glaciers n'étaient apparus sur le continent austral qu'il y a 20 millions d'années seulement. Or de nombreux indices reconnus à partir des années 1980 – dépôts glaciaires dans les sédiments marins, notamment – ont épinglé le début de la glaciation antarctique au milieu de l'Éocène (15 millions d'années plus tôt), juste avant les premières crises du plancton dans les mers, et des mammifères sur les continents.

Dans ce scénario de dérive continentale et de glaciation, l'Antarctique était rattaché jusqu'alors à l'Afrique du Sud d'un côté, et à l'Australie de l'autre. Il était atteint par les courants d'eau chaude qui descendaient en boucle depuis les régions équatoriales, tant dans l'océan Atlantique que dans l'océan Pacifique et l'océan Indien. Lorsque l'Antarctique s'est détaché de l'Australie, puis de l'Afrique du Sud, toute la circulation océanique s'en est trouvée chamboulée : un courant froid pouvait désormais tournoyer sans obstacle autour de l'Antarctique, l'isolant des courants chauds. Toute humidité parvenant par voie aérienne au continent austral allait donc s'y précipiter sous forme de neige et se compacter progressivement en glace.

Le refroidissement mondial de la transition Éocène/Oligocène s'est accompli en plusieurs étapes, au vu du registre fossile des planctons de l'époque et des isotopes de l'oxygène contenu dans leurs charpentes minérales (voir

www.frenchpdf.com

encadré page 92). Peut-être correspondent-elles au détachement de l'Antarctique, d'abord de l'Australie puis de l'Afrique du Sud. On estime d'ailleurs que l'englacement de l'Antarctique affecte d'abord sa moitié orientale, puis sa moitié occidentale.

D'autres effets se greffent à ceux des courants marins et des précipitations neigeuses. Ces neiges qui s'accumulent sur l'Antarctique ont pour origine l'eau marine qui s'est évaporée au niveau des tropiques. Or, comme cette eau est séquestrée sous forme de glace sur le continent et ne retourne pas à la mer, le niveau marin baisse. Et plus le niveau baisse, plus les plateaux continentaux sont mis à sec, leurs sédiments clairs réfléchissant mieux la lumière solaire vers l'espace que les sombres océans qui les recouvraient, ce qui fait encore baisser la température.

Quant aux conséquences biologiques d'une baisse du niveau marin, elles sont directes : la surface immergée du plateau continental diminuant, ses populations de poissons, coquillages et crustacés s'y trouvent de plus en plus à l'étroit, d'où une concurrence pouvant mener à des extinctions. En sus du refroidissement des eaux, cela peut aider à expliquer les hécatombes notées chez les gastéropodes et les bivalves.

Ajoutons un effet supplémentaire : qui dit surface continentale plus grande, causée par le retrait des mers, dit plus grande exposition de roches à l'atmosphère et altération chimique plus ample. Or le dioxyde de carbone de l'atmosphère, dissous dans l'eau de pluie, attaque les frais minéraux exposés et reste piégé dans leurs produits d'altération, en formant notamment des carbonates. Du coup, le dioxyde de carbone est pompé hors de l'atmosphère, diminuant l'effet de serre et amplifiant le refroidissement. Sans compter que, comme la température des océans diminue et que l'eau froide dissout plus de dioxyde de carbone que l'eau chaude, une quantité encore plus grande de ce gaz est pompée hors de l'atmosphère.

On voit ainsi, à travers ces quelques exemples, comment un début de refroidissement peut se prêter à des amplifications en chaîne du phénomène. C'est particulièrement intéressant, parce que c'est ce type d'emballement de la machine Terre que l'on peut craindre aujourd'hui dans notre mauvaise gestion du climat, sauf que dans notre cas ce serait plutôt un emballement vers le chaud dont on doit se méfier.

Naissance du genre humain

Une fois passé le chamboulement de l'écosystème durant la transition Éocène/Oligocène, la poursuite graduelle de la baisse de température, ponctuée de paliers ou de brefs réchauffements, n'a plus perturbé outre mesure les communautés animales et végétales.

Ainsi, l'écosystème ne connaît pas de bouleversements majeurs à l'échelle planétaire en ces périodes plutôt fraîches qui vont suivre, que ce soit l'Oligocène, le Miocène ou le Pliocène (34 à 2,6 millions d'années). Cela étant, d'intéressants événements se déroulent dans le détail, lorsqu'on se focalise sur une région ou sur un groupe d'animaux en particulier.



La surrection du Grand Rift est-africain, en faisant obstacle aux vents chargés d'humidité, a transformé la forêt en savane aride : les changements climatiques ont certainement joué un rôle dans l'émergence et l'évolution de nos ancêtres australopithèques. En bas à droite, reconstitution du crâne de la célèbre Lucy (*Australopithecus afarensis*) qui a vécu dans le rift il y a 3,2 millions d'années. (© Rift : Miroslav Liska [agence 123rf.com] ; Lucy : pbuergler/ Wikimedia [CC BY-SA 3.0].)

C'est le cas notamment en Afrique de l'Est avec de grandes manœuvres tectoniques qui commencent il y a 30 millions d'années par la montée d'un point chaud sous l'Éthiopie, soulevant et déchirant l'écorce terrestre. Nous avons déjà évoqué ces trapps d'Éthiopie, sans effet notable sur le monde vivant, qui inondent de leurs laves des centaines de milliers de kilomètres carrés.

www.frenchpdf.com

La déchirure se propage vers le nord, ouvrant le rift de la mer Rouge et séparant l'Arabie du continent africain. Elle se propage aussi vers le sud à travers l'Afrique de l'Est en deux faisceaux divergents : la branche orientale traverse ce qui deviendra plus tard l'Éthiopie, le Kenya et la Tanzanie ; et la branche occidentale décroche vers le Rwanda et le Burundi pour longer la frontière entre Tanzanie et République démocratique du Congo, avant que les deux branches ne se retrouvent au sud pour fusionner en Mozambique.

Débutée il y a 25 millions d'années environ, cette mise en place du Grand Rift va progressivement changer le relief de l'Afrique de l'Est et donc son climat. Au centre des faisceaux de failles, la croûte distendue va s'effondrer en grandes marches d'escalier vers une vallée centrale, alors que sur les bordures vont s'élever au contraire des épaulements – hauts plateaux qui vont fortement affecter le régime des vents et des précipitations. La couverture jusqu'alors uniforme de forêts tropicales, peuplée d'une riche communauté de primates arboricoles, va se morceler pour livrer place à des savanes, là où les précipitations ne passent plus.

Dès les années 1970, les spécialistes de la tectonique des plaques ont pressenti que la naissance du genre humain dans le Grand Rift africain n'était peut-être pas le fruit du hasard et pouvait découler de ces changements climatiques. J'ai moi-même présenté cette hypothèse en novembre 1979 à un symposium de l'Unesco à Paris, auquel assistait le paléontologue Yves Coppens. En voici la teneur, telle que je l'ai publiée l'année suivante :

« Pour que la branche humaine se développe, il fallait un bouleversement, un changement de décor qui mette les primates arboricoles en péril et que l'évolution animale ne pouvait contrer qu'en élaborant une nouvelle créature, beaucoup mieux adaptée : l'homme.

« Justement il y eut en Afrique un changement de décor radical, survenu au cours des derniers millions d'années : la création du Grand Rift. Avec ses tremblements de terre et ses éruptions volcaniques, la déchirure de la croûte africaine entraîna un bouleversement complet du relief, du climat et de la végétation. Les mouvements tectoniques amenèrent la fosse centrale à s'effondrer et leurs remparts à grimper vers le ciel ; les crêtes qui s'étaient ainsi formées plongèrent leurs versants orientaux dans l'ombre des nuages.

« L'opération ne se fit pas du jour au lendemain : au contraire, le changement du paysage fut progressif et les animaux eurent le temps de s'y adapter. Fini les grandes forêts tropicales qui s'étendaient à perte de vue. Les changements d'altitude et de précipitations entraînèrent leur déclin : à leur place s'installèrent les savanes. Drôle de surprise pour les primates qui voyaient leurs forêts diminuer en superficie comme une peau de chagrin : bientôt il n'y avait plus assez de place dans les arbres et la nourriture s'y faisait rare. Les voilà contraints à descendre de leurs perchoirs et à parcourir les savanes. Sans doute parce que les hautes herbes leur coupaient la vue, ces ancêtres de l'homme adoptèrent la position debout pour mieux voir leurs ennemis et chercher leur nourriture. […] Stimulé par tous ces nouveaux développements, le cerveau des bipèdes se développa à un rythme extraordinaire : il y a un peu plus [*en fait un peu moins*] de trois millions d'années, le genre humain voyait le jour et construisait les premiers outils3. »

Présent à cette communication de 1979, Yves Coppens m'exprima d'abord son scepticisme, avant d'être conquis par le concept, puisqu'il le popularisa par la suite sous le joli nom d'*East Side Story*.

Bien sûr, il s'agit d'un scénario assez grossier. La maîtrise de la bipédie, accompagnée de la croissance de la capacité crânienne et de l'intelligence chez nos ancêtres australopithèques, n'est peut-être pas directement et exclusivement due à l'ouverture du rift et à son bouleversement climatique. En 2001, l'anthropologue Michel Brunet et son équipe ont ainsi trouvé les restes fossiles d'un lointain ancêtre de la lignée humaine – *Sahelanthropus tchadensis* ou « Toumaï » – en plein centre du Tchad, près de 4 000 kilomètres à l'ouest du rift. Certains indices laissent à penser que Toumaï, âgé de 7 millions d'années et qui vivait apparemment en milieu forestier, était déjà bipède, bien avant les australopithèques du Grand Rift, ce qui mettrait à mal la thèse de l'*East Side Story* quant au développement de la bipédie.

Cela étant non seulement il n'est pas totalement prouvé que Toumaï ait été majoritairement bipède, mais la bipédie a pu être « inventée » plusieurs fois de façon indépendante par plusieurs lignées d'espèces pour une multitude de causes diverses, y compris dans le Grand Rift.

Toujours est-il que ce Grand Rift d'Afrique de l'Est et ses changements climatiques ont servi de cadre au foisonnement des espèces dont sortira *in fine* la lignée humaine, et même si leur bipédie n'y est pas née, les autres évolutions conduisant au genre humain s'y sont indubitablement déroulées. Les anthropologues américains René Bobe et Anna Behrensmeyer4 sont convaincus que plus encore que le changement général du climat lors de la mise en place du rift, ce sont ses oscillations périodiques qui ont influencé l'évolution humaine : pas le changement climatique tout court, mais la répétition des changements.

En étudiant les sédiments lacustres du bassin de Turkana, à la frontière de l'Éthiopie et du Kenya, ils notent une importante inflexion climatique entre 2,8 et 2,6 millions d'années, la faune et la flore fossiles indiquant un déclin des forêts tropicales et leur remplacement par des bois variés et morcelés. C'est à cette époque précisément qu'apparaît le *Paranthrope*, australopithèque robuste qui est résolument bipède mais qui ne mènera pas, finalement, au genre humain.

www.frenchpdf.com

Mieux encore : l’anthropologue américain Brian Villmoare et ses confrères ont annoncé en mars 2015 la découverte dans les Afars d’Éthiopie d’une mandibule fossile vieille de 2,8 millions d’années, qui semble représenter une espèce transitoire entre l’australopithèque et le genre humain : le fossile est associé à des restes d’autres mammifères qui pointent résolument vers un environnement plus ouvert et plus aride5.

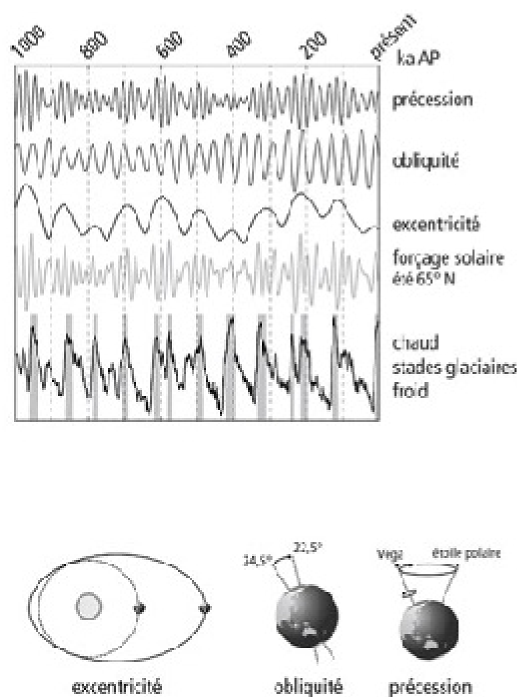
Dans la foulée (si l’on peut dire pour nos apprentis bipèdes), c’est lors du bouleversement suivant de l’écosystème, entre 2,4 et 2,2 millions d’années, lorsqu’on constate une nette expansion de la savane au détriment de la forêt, qu’émerge le genre humain au sens strict, *Homo habilis*, il y a 2,33 millions d’années. Sa boîte crânienne avoisine 600 centimètres cubes (alors que l’australopithèque Lucy, un million d’années auparavant, plafonnait à 400 centimètres cubes), et on lui attribue les premiers outils trouvés dans les sédiments du même âge : des galets grossièrement taillés sur une face, apparemment conçus pour dépecer le gibier.

À la révolution suivante de l’écosystème, il y a 2 à 1,8 million d’années, lorsque la savane devient prépondérante comme l’attestent les fossiles de nombreux herbivores qui lui sont adaptés, *Homo erectus* fait son apparition, avec une boîte crânienne entre 750 et 1 000 centimètres cubes, les premiers outils bifaces alliant efficacité et esthétique, et de longues jambes faites pour arpenter les grands espaces.

Il se confirme donc que les principales étapes de l’évolution humaine sont synchrones avec les variations climatiques régionales qui ont affecté le Grand Rift est-africain : une relation de cause à effet apparaît de plus en plus probable.

L’âge glaciaire

Pendant que le climat régional façonne le destin de la lignée humaine en Afrique de l’Est, l’hémisphère Nord va lui aussi connaître des oscillations climatiques – à une échelle multicontinentale – qui débutent pour leur part il y a 2,58 millions d’années. Elles vont surtout se faire sentir en Eurasie et en Amérique du Nord, au point de définir un nouveau chapitre de l’histoire de la Terre que l’on va appeler Pléistocène ou « âge glaciaire ».



Cycles de Milankovitch

Les variations périodiques de l’inclinaison de l’axe de rotation de la Terre (obliquité) et de son pointage (précession), ajoutées à celles de l’excentricité de l’orbite terrestre, induisent des différences d’ensoleillement (forçage solaire) qui sont responsables de nos périodes glaciaires et interglaciaires (barres grises). Ici, les courbes au cours du dernier million d’années (dates en nombre de millénaires avant aujourd’hui).

Le nom est trompeur : si les deux derniers millions d’années et demi voient se poursuivre la baisse mondiale de la température sur le long terme, dans le détail se creusent des oscillations climatiques qui font se succéder périodes froides et périodes moins froides qui prennent le nom de glaciaires et d’interglaciaires.

www.frenchpdf.com

La chute initiale des températures qui introduit ce nouveau cycle relève d'un processus qui fait pratiquement l'unanimité chez les chercheurs. De même que la première dégringolade des températures lors de la transition Éocène/Oligocène, entre 40 et 35 millions d'années, est attribuée à une séparation continentale isolant l'Antarctique au niveau du pôle Sud et le transformant en un réfrigérateur accumulant les glaces, la nouvelle baisse du thermomètre commencée il y a environ 3 millions d'années est de nouveau mise sur le compte d'une péripétie de la tectonique des plaques, sauf qu'il ne s'agit pas cette fois d'une séparation continentale, mais au contraire d'une jonction.

Jusqu'alors, Amérique du Nord et Amérique du Sud étaient séparées par un chapelet d'îles volcaniques laissant passer de forts courants océaniques du Pacifique vers l'Atlantique, une circulation équatoriale qui limitait quelque peu l'établissement de courants nord-sud. Or ce détroit centraméricain va progressivement se fermer avec la montée, le long de failles, de blocs « bouchant les trous », menant à la construction d'un cordon ininterrompu – l'isthme de Panama – qui relie les deux Amériques.

On ne connaît pas encore les étapes et le timing exact de cette fermeture – les avis divergent – mais au final les courants océaniques ont été réorientés : le flux désormais bloqué le long de l'équateur, ce sont des courants d'équateur à pôles qui le remplacent dans l'hémisphère Nord, notamment dans l'Atlantique. Les courants chauds et les masses de vapeur d'eau qui s'en évaporent gagnent l'Arctique : quand cet air humide se refroidit, il se met à neiger sur le Groenland et d'autres îles des hautes latitudes, imitant ce qui s'était déjà passé 30 millions d'années plus tôt au-dessus du pôle Sud.

Après l'Antarctique, la Terre se dote ainsi d'un second réfrigérateur géant au-dessus de l'Arctique, ses glaces réfléchissant une fraction supplémentaire de la lumière solaire vers l'espace. La température globale de la planète dégringole d'un nouveau cran, les eaux de l'Atlantique Nord connaissant notamment une baisse de 2 °C.

Une fois accompli cet englacement du Groenland et du Grand Nord canadien, avec même formation d'une banquise sur l'océan Arctique, il va se produire un fin réglage du système qui va faire osciller le climat entre deux états d'équilibre : une glaciation boréale modeste, épisodes que l'on appellera « stades interglaciaires » ; et une glaciation boréale plus poussée, lorsque la couverture de glace grandit et s'étend vers le sud, épisodes que l'on appellera « stades glaciaires ».

Les oscillations climatiques ont toujours existé, mais elles vont être amplifiées par cette disposition particulière des courants océaniques, à partir de 2,5 millions d'années. Si le mécanisme exact de cet effet amplificateur reste à préciser, le phénomène de base qu'il amplifie est quant à lui tout à fait connu : c'est le comportement cyclique de la Terre dans sa course autour du Soleil.

En fait, c'est la faute aux autres planètes. La Terre aurait un comportement orbital à peu près stable, si elle n'avait pas de perturbantes voisines. Tant Vénus que Mars, et même les distantes mais massives Jupiter et Saturne, tiraillent notre planète, au point de légèrement déformer son orbite et d'affecter son axe de rotation.

Pressenties dès 1824 par le géologue danois Jens Esmark, ces perturbations orbitales furent mises en équation par le mathématicien français Joseph Adhémar à partir de 1842. Mais l'histoire a surtout retenu les travaux et le nom du géophysicien serbe Milutin Milankovitch qui publia l'étude détaillée de ces cycles astronomiques en 1924, de sorte qu'en son honneur ils sont aujourd'hui nommés « cycles de Milankovitch ». Cela vaut la peine de les rappeler en détail, car ils forment le soubassement de notre situation climatique actuelle.

Ces cycles sont au nombre de trois[6]. Le plus connu est appelé précession des équinoxes : il concerne le fait que l'axe de rotation de la Terre est incliné, plutôt que droit comme un « i », par rapport au plan de sa course autour du Soleil (le plan de l'écliptique, disent les astronomes). En ce moment, l'axe est incliné de 23 degrés et 27 minutes (23° 27′) et pointe vers l'étoile Polaire. Cela nous vaut nos saisons : lorsque cette inclinaison fait qu'à un point de notre orbite l'hémisphère Nord pointe vers le Soleil, c'est l'été dans cet hémisphère (et l'hiver dans l'hémisphère Sud). Six mois plus tard, de l'autre côté du Soleil, comme le pointage n'a pas changé, les rôles sont inversés : notre hémisphère Nord tourne le dos au Soleil et c'est au tour de l'hémisphère Sud de connaître l'été.

Jusqu'ici, c'est le rythme habituel des saisons : nous n'avons pas encore introduit les perturbations dues aux autres planètes. Mais à cause d'elles, notre axe de rotation est tiraillé : il tournoie dans l'espace, tel un gyroscope lorsqu'on le perturbe du doigt. Il décrit ainsi un cône dans l'espace en 26 000 ans, pointant dans d'autres directions du ciel avant de revenir pointer de nouveau, au bout d'un cycle complet, vers l'étoile polaire.

En lui-même ce balayage ne change rien à l'insolation, aux saisons et au climat : il décale juste d'une année sur l'autre l'endroit de l'orbite (donc le jour de l'année) où commence et se termine chaque saison (solstices et équinoxes) : c'est pourquoi on l'appelle « précession des équinoxes ».

Les choses deviennent intéressantes lorsqu'on se rend compte que l'orbite de la Terre n'est pas vraiment un cercle, mais une ellipse légèrement allongée : on est un pour cent (un million et demi de kilomètres) plus loin du Soleil en juillet qu'en janvier. Cela signifie qu'à notre époque, comme c'est l'été en juillet dans l'hémisphère Nord et l'hiver dans l'hémisphère Sud, l'été boréal et l'hiver austral sont légèrement plus froids que la moyenne (moins d'insolation de la part du Soleil puisqu'on en est plus distant). À cause de la précession des équinoxes, un demi-cycle plus tard

www.frenchpdf.com

(soit 13 000 ans), l'été boréal et l'hiver austral auront lieu en revanche lors du passage de la Terre au plus près du Soleil : ils seront cette fois un peu plus chauds que la moyenne.

L'effet n'est pas énorme : 1 % de variation dans cette distance Terre-Soleil ne se traduit que par une variation d'insolation de 2 % au cours de l'année. Mais on peut exagérer le phénomène, et c'est là qu'intervient le deuxième des cycles de Milankovitch : l'allongement de l'orbite terrestre – son « excentricité » – varie lui aussi périodiquement. D'un cercle parfait (excentricité zéro), il passe par le stade actuel (1 % de variation dans la distance Terre-Soleil) pour atteindre un allongement maximal (6 % de variation), puis revenir au zéro initial en environ 100 000 ans. Lors de l'excentricité maximale, les calculs enseignent que l'insolation frappant la Terre varie de 12 % tout au long de l'orbite, ce qui est beaucoup plus conséquent qu'aujourd'hui.

Enfin, un troisième cycle intervient qui voit l'axe de rotation de la Terre hocher périodiquement (ce que fait là aussi un gyroscope malmené), s'inclinant de plus en plus (jusqu'à 25 degrés) puis se redressant (jusqu'à 20 degrés), selon un cycle de 41 000 ans. On appelle ce hochement la variation de l'obliquité.

Faites la somme de tous ces cycles – précession des équinoxes, excentricité, obliquité – et vous aurez une courbe complexe de l'insolation reçue en un point donné du globe. Dans le cas le plus extrême, vous pouvez atteindre une variation de 22 % de l'insolation reçue au niveau du cercle polaire. Presque un quart d'insolation en plus ou en moins, c'est énorme. Et son timing – le moment de l'année où ont lieu maximum et minimum – est particulièrement important. On sait maintenant que c'est tout cela qui déclenche les stades glaciaires et interglaciaires sur Terre, selon le scénario suivant.

Lorsque l'insolation est minimale l'été sur l'Arctique, les neiges tombées l'hiver précédent ne se réchauffent pas assez pour fondre. Elles vont demeurer là et se couvrir d'une nouvelle couche l'hiver suivant, qui ne fondra pas non plus, l'été venu. D'année en année la couverture neigeuse va s'épaissir, se compacter en glace, refroidir de plus en plus le paysage et l'envahir de glaciers. Cette expansion des glaces est ce qui caractérise un stade glaciaire. En Europe, la calotte de glace – ou inlandsis – va descendre recouvrir toute la Scandinavie et la Grande-Bretagne jusqu'aux portes de la France.

Au bout de plusieurs dizaines de milliers d'années, excentricité, obliquité et précession des équinoxes vont se liguer pour produire l'effet inverse : de minimale, l'insolation devient maximale l'été sur l'Arctique et la calotte de glace se met à fondre, année après année. Les glaciers reculent, le climat se réchauffe, et la Terre entre dans un stade interglaciaire : c'est le cas aujourd'hui.

Il faut souligner que les cycles de Milankovitch ont toujours existé au cours de l'histoire de la Terre, mais ils n'ont eu d'influence aussi notable sur le climat que lorsque les conditions s'y sont prêtées. Dans le cas présent, depuis un peu moins de trois millions d'années, c'est le positionnement des masses continentales près du pôle Nord – notamment le Groenland – et le fait que des courants océaniques en boucle leur apportent humidité et précipitations neigeuses qui font la différence.

Dans le détail, la complexité du phénomène est telle que sa périodicité varie : au début de la séquence initiée il y a 2,5 millions d'années, stades glaciaires et interglaciaires se sont succédé selon un cycle de 41 000 ans, qui correspond à celui du « hochement » de l'axe de rotation de la Terre (variation de l'obliquité), accentuant l'amplitude des saisons. Mais depuis 800 000 ans environ, et pour des raisons que l'on ignore, la périodicité du cycle s'est allongée pour passer à 100 000 ans environ, ce qui correspond davantage à la fluctuation de « l'allongement » de l'orbite terrestre (variation de l'excentricité), à moins que ce ne soit une combinaison subtile de plusieurs cycles dont la somme vaut 100 000 ans.

Dernier élément de complexité : à l'intérieur d'un cycle, il n'y a pas de symétrie. Stades glaciaires et interglaciaires n'ont pas la même durée, ni la même rapidité de mise en place. Le déclenchement d'un stade glaciaire est relativement progressif et débouche sur un englacement durable. À l'inverse, le réchauffement qui y met fin est relativement brutal et introduit un interglaciaire de courte durée. Puis c'est de nouveau un lent refroidissement qui mène au prochain cycle.

Ainsi, le dernier épisode en date a vu un stade glaciaire se mettre en place il y a 120 000 ans, au cours duquel la toute nouvelle lignée humaine – *Homo sapiens* – est sortie du Grand Rift africain pour se lancer à la conquête de l'Europe, de l'Asie, et même des Amériques, venant chasser jusqu'au bord des glaciers. Ce n'est qu'il y a 12 000 ans environ que la longue phase froide a pris fin brutalement, et que dans les conditions beaucoup plus avantageuses du présent interglaciaire, l'homme a développé l'élevage et l'agriculture, fondé les premières cités, et posé les bases de la civilisation moderne.

1.

Rappelons qu'on disait autrefois le Tertiaire, terme tombé en désuétude.

2.

www.frenchpdf.com

Le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) estime à 1 700 milliards de tonnes la quantité de carbone contenu dans les glaces du pergélisol, soit deux fois la quantité présente aujourd'hui dans l'atmosphère.

3.

FRANKEL C., *Quatre milliards d'années d'histoire de la Terre*, Éditions De Vecchi, Paris, 1980, p. 151-152.

4.

Université George Washington et Muséum national d'histoire naturelle de Washington. Leur article est cité dans la bibliographie.

5.

Brian Villmoare (université du Nevada) *et al.* décrivent le fossile ; et Erin DiMaggio (université de Pennsylvanie) *et al.* décrivent son environnement passé dans le numéro de *Science* du 5 mars 2015 (voir bibliographie).

6.

En fait, il y a cinq cycles en tout, mais l'essentiel des changements climatiques est dû aux trois premiers.

www.frenchpdf.com

4

L'homme entre en scène : premiers massacres

La mise en place de l'âge glaciaire, il y a environ 3 millions d'années, affecte surtout le Grand Nord. En parallèle, l'évolution du genre humain se poursuit en Afrique avec un foisonnement d'espèces cousines et concurrentes qui vont maîtriser le maniement des pierres, en particulier *Homo habilis* dont les premiers ossements – associés à des galets cassés sur une face – sont datés d'un peu moins de 2,5 millions d'années.

Puis, avec une stature parfaitement redressée et un cerveau plus volumineux, *Homo ergaster* (apparu il y a 2 millions d'années en Afrique) et *Homo erectus*, son descendant ou cousin émigré en Eurasie, sont crédités d'une société plus complexe, avec un artisanat développé – des pierres désormais taillées sur leurs deux côtés ou « bifaces » – ainsi probablement qu'un langage rudimentaire et le recours à la chasse organisée.

Petit à petit, vague après vague, ces hominidés s'implantent en Europe, chaque lot de squelettes découvert héritant d'un nom d'espèce et d'une position sur notre arbre phylogénique qui sont sources de nombreux débats, comme *Homo antecessor* en Espagne, qui détient le record du plus vieil Européen (1,2 million d'années), *Homo heidelbergensis* en Allemagne (600 000 ans) ou encore son représentant français, l'homme de Tautavel (400 000 ans). Les paléontologues s'accordent à penser qu'il s'agit là des ancêtres de l'homme de Néandertal.

Ce prototype d'homme moderne, pourtant très prometteur, ne sera pas la version définitive qui fondera la civilisation humaine. À partir de la population ancestrale d'*Homo ergaster/erectus* restée en Afrique va surgir, il y a 200 000 ans, un nouveau modèle plus grand et plus svelte, au crâne un peu plus volumineux encore : *Homo sapiens*. Cette nouvelle lignée va elle aussi quitter l'Afrique, il y a 100 000 ans environ, passant d'abord au Moyen-Orient pour migrer vers l'Asie et l'Australie, puis pénétrant en Europe il y a 40 000 ans, où elle entrera en concurrence avec l'homme de Néandertal, son précurseur. Les deux lignées humaines cohabiteront quelque temps avant qu'*Homo sapiens* ne prenne définitivement le dessus, traquant les grands mammifères – rennes, bisons et mammouths – qui habitent les steppes en bordure des glaciers.

La mégafaune

Une faune richissime s'est en effet développée au cours de l'âge glaciaire, s'adaptant au froid et à une végétation à base de buissons et de graminées. Ces animaux n'ont pas surgi de nulle part : chaque genre a son propre parcours. C'est le cas du mammouth, originaire d'Afrique, qui parvient en Eurasie il y a 3 millions d'années, traverse les nombreux cycles de glaciations et d'interglaciaires, et évolue en plusieurs espèces dont deux vont s'implanter durablement en Europe, il y a 600 000 ans environ : le mammouth des steppes et le mammouth laineux.

Il en est de même pour le cerf géant – le *Megaloceros*, haut de deux mètres au garrot, venu pour sa part des steppes asiatiques –, le bison des steppes, descendant des buffles africains, qui fait son apparition en Europe il y a 900 000 ans, ou encore le rhinocéros laineux, à la corne aplatie sur les côtés pour lui servir de pelle et dégager la neige, dont les ancêtres vivaient dans l'Himalaya et qui est parvenu en Europe il y a 200 000 ans.

Certains, comme le mammouth et le rhinocéros laineux, sont adaptés au climat froid et prospèrent lors des stades glaciaires. D'autres préfèrent au contraire les stades interglaciaires de réchauffement et montent vers le nord se mêler à leurs cousins laineux, comme les léopards et même les hippopotames, et se replient vers le sud dès qu'il fait froid.

www.frenchpdf.com



La grotte Chauvet-Pont d'Arc, en Ardèche, est un véritable musée de la mégafaune française il y a 35 000 ans : dessinés au charbon sur la roche, on note ici non seulement des chevaux, mais aussi des aurochs, et en bas deux rhinocéros qui s'affrontent. (© Thomas T./Wikimedia [CC BY-SA 2.0].)

Leur point commun, c'est qu'il s'agit tous de gros animaux, et on les décrit collectivement sous le nom de *mégafaune*. Pour qu'une espèce mérite cette appellation, ses adultes doivent dépasser la barre des 50 kilogrammes environ, mais nombre d'entre eux pèsent plus d'une tonne. Le mammouth, par exemple, pouvait atteindre cinq à six tonnes, tout comme l'éléphant d'Afrique aujourd'hui.

On connaît tous ces animaux particulièrement bien, grâce à l'abondance de leurs fossiles – ossements récents et d'autant mieux préservés qu'ils sont gros et solides. Certains spécimens ont même été préservés entiers, chair et peau comprise, dans le pergélisol de Sibérie, voire dans des nappes de saumure, à l'instar d'un rhinocéros laineux exposé au musée de Cracovie. Et leurs chasseurs, notamment *Homo sapiens*, en ont fait de splendides portraits sur les murs des grottes, que ce soit au Font-de-Gaume, à Lascaux ou à la grotte Chauvet.

Mais outre leurs dimensions extraordinaires et leurs différences notables avec la faune actuelle de l'Europe, les naturalistes qui les ont recensés au cours des tout derniers siècles ont dû se creuser les méninges pour expliquer non seulement leur existence, mais surtout leur disparition soudaine, au point que le déluge biblique fut maintes fois invoqué.

Or ce n'est pas un déluge qui les a effacés du paysage, mais selon toute vraisemblance l'homme lui-même, et c'est ce que nous allons chercher à démontrer.

L'homme face au génocide

La mégafaune, tant glaciaire que tempérée, commence à s'effondrer il y a 50 000 ans environ, le timing exact de la vague d'extinctions variant d'un continent à l'autre, pour se conclure il y a 10 000 ans environ, faute de combattants ou, devrait-on dire, faute de victimes.

Il ne s'agit pas d'un phénomène mineur. En Europe, Australie, Amérique du Nord et Amérique du Sud, la mégafaune perd 101 genres de grands mammifères sur 142, soit une extinction générique de l'ordre de 70 % (et pire au niveau des espèces, dont on ignore le nombre exact). Pour les animaux plus petits, sous la barre des 10 kilogrammes, il n'y a pas en revanche d'extinctions notables à cette époque.

Si l'on se limite à la mégafaune, la perte générique est comparable à celles des plus grandes extinctions de l'histoire de la vie sur Terre, comme la crise de la fin du Crétacé. L'ampleur de l'événement saute donc aux yeux, tout comme sa brièveté : un déclin en moins de 50 000 ans – et sur certains continents en moins de 2 000 ans comme nous allons le voir – est quasi instantané à l'échelle géologique. Qu'il soit si récent nous permet d'en avoir une vision détaillée, les strates fossilifères étant nombreuses et faciles d'accès, ce qui nous simplifie la tâche quant à la recherche des causes.

www.frenchpdf.com

La première hypothèse évidente, c'est que l'homme serait responsable de cette extinction en masse de la mégafaune. La disparition de ces gros animaux coïncide en effet avec la montée en puissance de bandes organisées de chasseurs – la dispersion d'*Homo sapiens* à travers le monde – dotés d'armes de jet de plus en plus sophistiquées. La mise en examen de ce premier suspect date du milieu des années 1960, lors d'un congrès de l'Union internationale pour la recherche sur le Quaternaire, à Boulder au Colorado. C'est l'anthropologue américain Paul Martin qui s'en est fait le procureur général.

Cela étant, pour déclarer l'homme coupable, il faut comme dans tout procès des preuves solides, d'autant que l'accusation est très grave et qu'elle a d'importantes répercussions sur le débat actuel qui voit certains penseurs tenter de minimiser l'impact de l'homme sur l'environnement. Le massacre d'un aussi grand nombre d'espèces par l'homme, s'il était avéré, constituerait un précédent inquiétant, démontrant que la biosphère ne récupère pas nécessairement de nos actions et que nous pouvons transformer de façon irréversible la face de la Terre.

À la décharge d'*Homo sapiens*, les avocats de la défense font valoir que la disparition de la mégafaune coïncide également avec la fin chaotique de la dernière glaciation : après un pic d'avancée des glaciers il y a 21 000 ans, un réchauffement progressif s'amorce il y a 15 000 ans, qui est brutalement entrecoupé il y a 12 800 à 11 500 ans par une rechute glaciaire particulièrement froide dans l'hémisphère Nord, connue sous le nom de Dryas récent. Nombre de paléontologues voient dans ce frigorifique soubresaut du Dryas un mécanisme bienvenu pour expliquer l'effondrement de la mégafaune et faire passer la responsabilité de l'homme au second plan.

Depuis la fin des années 1960 et la première mise en examen de l'homme dans cette affaire, le débat fait donc rage pour déterminer qui, de l'homme ou du climat, est principalement responsable, et si c'est l'homme, de quelle manière. Les scénarios vont d'un déclin progressif des populations animales (théorie de l'*overkill*) sous le coup d'une chasse de plus en plus taxante à mesure que l'espèce humaine se multiplie, à celui d'un déclin plus brutal lors de traques intensives de la mégafaune par des bandes de chasseurs organisées faisant irruption dans des contrées jusque-là inexplorées (théorie du *blitzkrieg* ou « guerre éclair »). S'y greffent des théories annexes de destruction de l'habitat animal, volontairement ou pas, à coups de feux de brousse et autres interventions intempestives de notre espèce.

Pour progresser dans l'enquête, un certain nombre de questions peuvent être posées. Où étaient les suspects, à savoir nos ancêtres *Homo sapiens*, au moment du drame ? A-t-on trouvé leurs armes sur les lieux du « crime » ? Et si c'était au contraire la faute au climat, les perturbations climatiques sont-elles bien contemporaines des extinctions et se sont-elles bien fait sentir aux endroits concernés ?

En premier lieu, le timing des extinctions et de la progression à travers le monde de la population humaine est crucial. Or nous avons la chance de disposer de plusieurs scènes de crime – les différents continents – pour tester nos hypothèses.

Le cas troublant de l'Afrique

Le premier continent à considérer, et non le moindre, c'est l'Afrique : le creuset du genre humain. Manque de chance, pour la période en question, les sites fossilifères sont plus rares qu'ailleurs et donc les extinctions de la mégafaune mal datées. Ainsi, on s'est longtemps appuyé sur des données compilées dans les années 1990, qui établissent qu'entre 100 000 ans et 10 000 ans avant le présent – sans plus de précision – sept genres seulement disparaissent (dont un éléphant, un cheval, un bison et un chameau) et trois autres lors des dix derniers millénaires (un buffle, un bison et une antilope), alors que 38 genres survivent, ce qui ne représente qu'un taux d'extinction de la mégafaune de 20 % environ, bien inférieur à la moyenne hors Afrique (70 %).

Cela semble paradoxal : là où le genre humain est né, où la chasse a été inventée, la mégafaune aurait apparemment moins souffert qu'ailleurs. Est-ce que cela ne disculperait pas l'homme dès le départ, laissant au refroidissement du climat dans les contrées nordiques (alors qu'il n'a pas dû beaucoup jouer en Afrique) la responsabilité principale des extinctions ?

Pas si vite. On peut faire valoir plusieurs arguments qui brouillent les cartes en Afrique. D'une part, le genre humain y a progressivement coévolué avec les autres animaux durant plus de deux millions d'années, ce qui a permis à un équilibre de s'instaurer entre chasseurs et chassés dans cet écosystème – le grand gibier s'adaptant progressivement à la présence de ce nouveau prédateur et développant des tactiques d'évitement, voire de lutte, qui l'auraient empêché d'être exterminé.

La seconde hypothèse, c'est que la population humaine en Afrique est restée relativement limitée en nombre, peut-être à cause de la coévolution avec l'homme d'un grand nombre de bactéries et de parasites qui aurait décimé ses rangs et freiné son expansion. Nos ancêtres s'en seraient en grande partie débarrassés en migrant vers les régions froides ou tempérées – climats qui conviennent moins à la prolifération de ces agents pathogènes. Ainsi, selon ce scénario, tant que les hommes restaient en Afrique, leur population bridée par les maladies ne représentait pas une menace fatale pour les grands animaux. C'est une piste intéressante, mais comme la précédente difficile à prouver.

Il y a aussi un troisième point de vue qui peu à peu se développe : la possibilité que notre appréciation de la

www.frenchpdf.com

mégafaune africaine et de ses extinctions est très incomplète, et que le petit nombre d'extinctions est une illusion.

Tout d'abord, on se focaliserait trop sur la dernière période glaciaire, associée au règne d'*Homo sapiens*, qui sert de cadre temporel aux extinctions sur les autres continents. En Afrique, il faut regarder plus loin : certains paléontologues comme notre « procureur » Paul Martin ont attiré l'attention sur le fait que la mégafaune africaine aurait commencé à décliner beaucoup plus tôt, avec notamment une première vague d'extinctions il y a 2 à 1 million d'années environ, qui a vu disparaître d'Afrique d'imposants animaux comme l'éléphant géant *Deinotherium*, le bizarre *Ancylotherium* avec son corps de paresseux et sa tête de cheval, et le félin *Homotherium* à dents de sabre, pour ne citer qu'eux.

Paul Martin a vite fait le lien entre cette première vague d'extinctions de la mégafaune africaine et la montée en puissance sur place du genre *Homo*, et particulièrement l'apparition d'*Homo ergaster/erectus*, dont on sait qu'il était déjà chasseur et qu'il commençait à maîtriser le feu. On pourrait ainsi argumenter qu'en Afrique nos ancêtres hominidés ont commencé très tôt à élaguer la mégafaune et à éliminer les espèces les plus vulnérables, de telle sorte qu'une fois *Homo sapiens* apparu, les espèces restantes étaient les plus résilientes et leur taux d'extinction *de facto* moins élevé que sur d'autres continents où l'homme a fait son apparition tardivement et d'un seul coup.

Toujours dans le sens d'une mauvaise lecture de l'histoire de la mégafaune en Afrique, mais cette fois en rapport avec l'époque récente, le paléontologue australien J. Tyler Faith considère quant à lui que l'on a énormément sous-estimé le nombre d'espèces qui s'y sont éteintes au cours des derniers 100 000 ans. À la lumière de nouvelles découvertes, il recense deux douzaines d'espèces, plutôt qu'une dizaine, qui disparaissent dans ce dernier intervalle de temps, tel le phacochère géant *Metridiochoerus*, un fourmilier, un rhinocéros, des équidés, et nombre d'antilopes. Certaines sont de nouvelles espèces fossiles jusqu'alors inconnues, d'autres des espèces que l'on avait cru mortes à des époques antérieures et qui ont apparemment perduré bien plus tard qu'on ne l'avait pensé, au point d'avoir été contemporaines d'*Homo sapiens*.

Cela étant, J. Tyler Faith n'en conclut pas pour autant que l'homme est responsable du massacre, bien au contraire. Partisan du changement climatique comme cause première des disparitions, il fait valoir que la majorité des victimes sont des brouteurs qui habitaient les savanes : ce serait le morcellement de cet habitat, au cours du dernier million d'années, qui aurait mis à mal ses populations.

Mais l'argument est à double tranchant. L'accusation pourrait rétorquer que si les brouteurs des savanes ont disparu en priorité, c'est qu'ils y étaient particulièrement visibles et faciles à chasser.

On voit donc, sur la seule foi de l'exemple africain, combien il est difficile de juger qui de l'homme ou du climat est responsable des extinctions. Pour trancher la question, nous avons heureusement la chance de pouvoir examiner d'autres scènes du « crime ».

La situation en Europe

Si le cas de l'Afrique est complexe et subtil, celui de l'Eurasie ne l'est pas moins, notamment parce que ses hautes latitudes sont beaucoup plus sensibles aux oscillations climatiques de l'âge glaciaire que le continent africain : elle se trouve directement exposée aux avancées et aux reculs des glaciers, et plusieurs lignées humaines vont y chasser tour à tour, voire en concurrence, avançant puis battant en retraite au fil de ces changements climatiques. Plus qu'ailleurs, influences de l'homme et du climat vont se superposer au point d'être difficilement dissociables.

L'écosystème en lui-même est remarquable. Courant de la côte atlantique jusqu'aux confins orientaux de la Sibérie, un large corridor de hautes herbes et de mousses et lichens se met en place entre les glaciers au nord et la lisière de la forêt au sud, que l'on qualifie de « toundra-steppe ». Lorsque le climat se refroidit, il s'élargit vers le sud ; lorsque le climat se réchauffe, il se contracte en une bande plus étroite, la forêt montant vers le nord et grignotant sa frontière méridionale.

C'est un corridor extraordinaire où se mélangent animaux du Nord et animaux du Sud, surtout en été lorsque les températures sont plaisantes et la végétation beaucoup plus fournie qu'on n'a coutume de le croire, au point que certains écologistes n'hésitent pas à le qualifier de véritable Serengeti européenne. On y croise un mélange improbable de rhinocéros laineux et d'hippopotames, de sangliers et de léopards, de mammouths et d'éléphants, de bisons et de hyènes. Les proportions des uns et des autres fluctuent constamment à partir des « réserves » favorites de chaque espèce : l'ours des cavernes préfère l'Europe de l'Ouest ; le mammouth et le rhinocéros laineux sont plus frileux qu'on ne le pense et quittent la Grande-Bretagne et l'Allemagne dès qu'il fait trop froid pour battre en retraite vers le sud ; et les aurochs et grands cervidés se rassemblent en lisière des forêts.

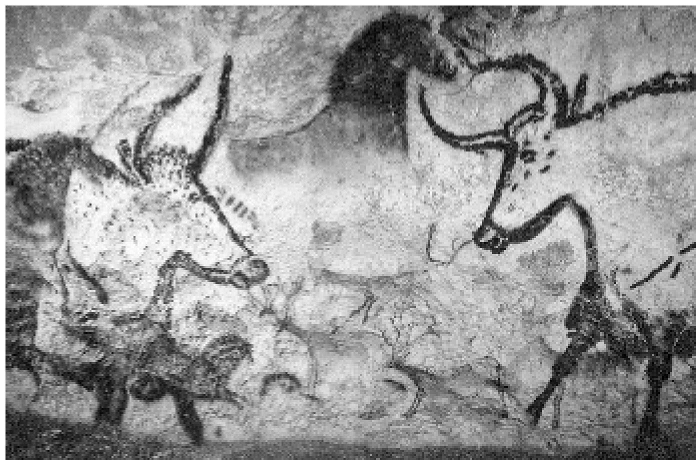
Comme partout ailleurs sur Terre, le terme de mégafaune pour cette ménagerie n'est pas usurpé. L'ours des cavernes (*Ursus spelaeus*) pouvait atteindre trois quarts de tonne, soit le double de l'ours brun actuel. Nos ancêtres lui vouaient un culte particulier, comme on peut le voir dans la grotte Chauvet en Ardèche, où un crâne d'ours trône sur une stèle rocheuse, ou encore dans la grotte de Montespan en Haute-Garonne où l'une des premières statuettes en argile fabriquée par l'homme est à l'effigie d'un ours des cavernes, sans compter les nombreuses représentations tracées à même les murs, que ce soit dans la grotte Chauvet ou dans celle des Combarelles en Dordogne.

www.frenchpdf.com

Le cerf géant, *Megaloceros giganteus*, mesurait près de deux mètres de haut au garrot, avec des bois impressionnants d'une envergure pouvant dépasser quatre mètres et pesant à eux seuls une cinquantaine de kilogrammes sur la demi-tonne que l'animal pouvait atteindre : lui aussi a impressionné les hommes et son portrait orne la grotte de Lascaux, ainsi que celle de Cougnac dans le Quercy, pour ne citer qu'elles.

Que dire sinon de l'éléphant et du mammouth ? L'éléphant de l'âge glaciaire (*Elephas antiquus*), apparenté à l'éléphant d'Asie actuel, pesait six à sept tonnes avec des défenses assez droites et une alimentation certainement adaptée aux forêts qu'il défrichait sur son passage. On en trouve des restes fossiles de l'Espagne à la Grande-Bretagne en passant par les Pays-Bas, et à travers l'Asie jusqu'au Japon. Quant au mammouth, représenté dans presque toutes les grottes – 158 portraits sur le seul site de Rouffignac en Dordogne –, on en trouve les ossements partout en Europe, et notamment quatre squelettes très complets en France, dont le dernier fut découvert en 2012 à Changis-sur-Marne. Ce n'est pas le spécimen le plus jeune, puisque son âge dépasse 50 000 ans, sans que l'on puisse être plus précis à l'heure actuelle. Particularité intéressante : deux éclats de silex ont été trouvés près du crâne, témoignant sinon de la chasse, du moins du dépeçage de l'animal par des hommes qui étaient obligatoirement, vu l'âge du spécimen, des hommes de Néandertal.

Enfin l'aurochs (*Bos primigenius*) mérite une mention particulière, lui qui dépassait comme le grand cerf deux mètres au garrot et pointait ses longues cornes en avant : il est représenté dans la plupart des galeries rupestres, que ce soit à la grotte Chauvet, au Font-de-Gaume, à Lascaux ou au Pech-Merle. Il connut un sort plus heureux que ses compagnons de l'âge glaciaire, puisqu'il se prêta aux premières tentatives de domestication par l'homme, il y a environ 10 000 ans : avant de disparaître dans sa forme sauvage (et fort tardivement d'ailleurs, car le dernier individu fut tué dans une forêt polonaise en 1627), l'aurochs a donné naissance à toutes les espèces de bovidés d'Europe qui peuplent nos élevages aujourd'hui.



Les bœufs sauvages ou aurochs, représentés ici sur les murs de Lascaux il y a 18 000 ans, ont échappé à l'extinction : nos ancêtres ont su en effet les domestiquer avant de les conduire à l'extinction. (© Prof Saxx/ Wikimedia [CC BY-SA 3.0].)

Avant l'élevage, bien sûr, il y eut la chasse. Nous avons vu que l'homme s'est très tôt infiltré dans cette ménagerie européenne, et notamment *Homo heidelbergensis* il y a plus de 400 000 ans. On date d'ailleurs de cette époque les restes d'un éléphant retrouvé dans le bassin de la Tamise en Grande-Bretagne, associés à des outils en silex. Des preuves directes de chasse ne tardèrent pas à suivre, attribuées à l'homme de Néandertal : ainsi le squelette d'un autre éléphant découvert à Lehringen en Allemagne, daté pour sa part de 125 000 ans, porte un épieu en bois planté entre deux côtes. À une époque où la population humaine en Europe devait être extrêmement clairsemée, cette association d'armes et d'outils avec les carcasses de grands animaux est déjà significative.

Lorsque *Homo sapiens* fait son apparition il y a 40 000 ans, il évince son cousin néandertalien. Était-il mieux armé que lui, mieux habillé de peaux de bête cousues à l'épreuve du froid, mieux organisé, ou en nombre supérieur ? Toujours est-il que l'invasion d'*Homo sapiens* exerce une pression accrue sur l'écosystème. Mais pour qu'il soit tenu responsable de l'effondrement de la mégafaune européenne, il faut que sa date d'apparition en Europe et celles des disparitions animales coïncident exactement. Est-ce bien le cas ?

Documenter les dates de disparition est comme toujours un art difficile non seulement parce que les techniques de datation sont complexes, mais aussi parce qu'il faut garder à l'esprit que le plus jeune spécimen recensé ne donne qu'une date provisoire de la disparition de l'espèce : toute découverte ultérieure d'un spécimen encore plus jeune retarde en effet la date de son extinction et change la donne.

Ainsi, l'extinction de l'éléphant européen fut longtemps considérée comme antérieure à 50 000 ans et à l'arrivée d'*Homo sapiens*. Or voilà qu'en 2007 on a daté des ossements aux Pays-Bas plus proches de 40 000 ans, et une

www.frenchpdf.com

gravure rupestre sur le site de Vermelhosa au Portugal, censée représenter une tête d'éléphant, suggère que l'espèce aurait même survécu sur la péninsule Ibérique jusqu'à 30 000 ans avant aujourd'hui.

Trois autres grands mammifères disparaissent dans la tranche de 40 000 à 15 000 ans qui correspond à l'époque charnière de l'arrivée d'*Homo sapiens* en Europe : le rhinocéros « interglaciaire » *Stephanorhinus*, l'ours des cavernes et la grosse antilope *Spirocerus*.

La tranche fatidique de 15 000 à 10 000 ans avant le présent correspond à une seconde vague d'extinctions qui élimine le rhinocéros laineux, le lion des cavernes (*Panthera spelaea*), le mammouth laineux et le cerf géant.

On peut toujours arguer que les sursauts du climat – un durcissement du froid et l'avancée maximale des glaciers il y a 25 000 ans, puis un nouveau pic glacial il y a 12 000 ans (le Dryas récent), suivi du réchauffement menant à l'époque actuelle – ont eu raison de toutes ces espèces sans que l'homme n'en soit le principal responsable. Mais il est étonnant que le rhinocéros interglaciaire soit arrivé en Europe il y a 600 000 ans, et le rhinocéros laineux il y a 170 000 ans au moins, pour ne citer qu'eux, et qu'ils aient essuyé d'autres oscillations climatiques tout aussi extrêmes durant ce long intervalle de temps sans dépérir… avant que l'homme n'arrive sur les lieux.

À l'échelle d'un continent, au demeurant, on pourrait penser que de telles oscillations climatiques permettent toujours aux espèces de migrer et de trouver une zone climatique qui leur convient, en changeant de latitude ou d'altitude. Qu'ils aient entièrement disparu suggère qu'ils ont été persécutés pour une raison autre, ou en tout cas supplémentaire, jusque dans leurs derniers refuges.

Lorsqu'il est connu dans le détail, le timing précis de l'extinction d'une espèce d'un point de vue géographique est à ce titre évocateur. Ainsi pensait-on que les derniers représentants du cerf géant s'étaient éteints en Irlande il y a 10 500 ans, à une époque où l'homme ne s'était pas encore établi sur l'île. Or, de nouveaux squelettes de cerfs ont été découverts, âgés de 9 500 ans seulement, qui repoussent leur disparition au moment même du débarquement en Irlande de nos chasseurs.

Un second exemple remarquable nous est offert par le mammouth, longtemps considéré comme ayant disparu il y a 12 000 à 11 000 ans. Or quelle ne fut pas la surprise des paléontologues russes lorsqu'ils découvrirent les squelettes de leurs derniers représentants, âgés de 4 000 ans seulement, sur l'île de Wrangel au large de la Sibérie orientale, le plus loin possible des chasseurs. Aucun changement climatique ne correspond à cette date ultime, mais c'est en revanche celle de l'arrivée de l'homme sur l'île.

En faisant la synthèse de toutes ces données, la disparition de la mégafaune en Europe semble suivre l'expansion numérique et géographique du genre humain, mais force est de reconnaître qu'elle est associée à des changements climatiques beaucoup plus rudes qu'en Afrique. Un changement défavorable à une espèce la forcerait à migrer vers des poches ou des refuges d'espace limité, avec diminution concomitante de sa population. En temps normal, il lui suffirait alors d'attendre le revirement cyclique du climat pour entrer en expansion de nouveau et reconquérir le territoire temporairement délaissé.

Or c'est là où la pression de l'homme aurait pu transformer un simple repli en un véritable siège, suivi d'un massacre local, voire d'une extinction planétaire s'il s'agit du dernier refuge de l'espèce. Dans ce scénario, *Homo sapiens* serait bien responsable de la disparition de la mégafaune européenne, mais bénéficierait de circonstances atténuantes, ayant profité des changements climatiques de l'époque.

S'il s'en tire plutôt bien en Afrique et en Europe, où un jury clément pourrait le relaxer sur le compte d'une insuffisance de preuves et la présence au moins d'un autre suspect (le climat), l'homme va avoir beaucoup plus de mal à prouver son innocence sur les deux dernières scènes de « crime » qu'il nous reste à examiner : l'Amérique et l'Australie.

L'Amérique se met à table

Si l'Afrique est un paradoxe et l'Europe une région complexe, les Amériques versent des pièces essentielles au dossier, et notamment l'Amérique du Nord. Plus que nulle part ailleurs, il s'agit de pièces à charge contre *Homo sapiens*.

L'Amérique du Nord se distingue par de nombreux sites de mégafaune bien datés, et un calendrier tout aussi précis de l'arrivée d'*Homo sapiens* : hormis quelques traces de campement plus anciennes et d'ailleurs contestées, l'immigration des Amérindiens par le détroit asséché de Béring lors du dernier stade glaciaire débute il y a 15 000 ans. Ces hommes venus d'Asie vont se répandre à travers toutes les Amériques et notamment dans les futurs États-Unis où les vestiges de leurs campements fleurissent de la côte ouest (État de Washington) à la Virginie et au Delaware, en passant par l'Arizona, le Nouveau-Mexique et le Texas. Ces vestiges comprennent des pointes de lance en silex ou en jaspe, cannelées à la base, là où elles sont fixées sur le projectile. Baptisée culture Clovis en référence à l'un des sites emblématiques près de la ville du même nom au Nouveau-Mexique, cette civilisation de chasseurs s'épanouit quatre siècles durant, de 12 900 à 12 500 ans avant le présent.

www.frenchpdf.com

Puis, en coïncidence avec une ultime vague de froid connue sous le nom de Dryas récent, la culture Clovis s'efface, les hommes se repliant sur une aire plus réduite au centre du continent, tout en « mutant » dans leurs habitudes et leur style d'outils, de sorte qu'on parle alors de culture Folsom. Cela n'empêchera pas certains archéologues d'y voir un effondrement brutal de culture, plutôt qu'une transition, et de rechercher des causes catastrophiques (voir encadré).

Si elle fut certainement précédée par quelques pionniers, la civilisation Clovis est reconnue en tout cas comme étant la plus ancienne occupation humaine à grande échelle du continent américain. Les foyers archéologiques ne se limitent d'ailleurs pas à l'Amérique du Nord, puisqu'on en trouve aussi au Mexique et en Amérique du Sud.

De fait, l'un des sites les plus anciens se trouve dans le désert de Sonora au Mexique, au lieu-dit *El Fin del Mundo* : la fin du monde. Daté de 13 400 ans, cinq siècles avant l'apogée de la culture Clovis, il annonce la couleur : à même le campement, où l'on trouve de belles pointes de lance en quartz translucide, reposent les ossements de deux gomphothères – de grands pachydermes semblables à des éléphants, aux mâchoires allongées serties de courtes défenses. Or les gomphothères font partie de la liste des grands animaux qui disparaissent précisément à cette époque.



Les pointes de flèche retrouvées sur le site de « la fin du monde » au Mexique, associées à des squelettes de pachydermes datés de 13 400 ans, illustrent la traque impitoyable de la mégafaune par les premiers *Homo sapiens* débarqués sur le continent américain. (© Fin del Mundo Project/U. of Arizona/INAH Mexico.)

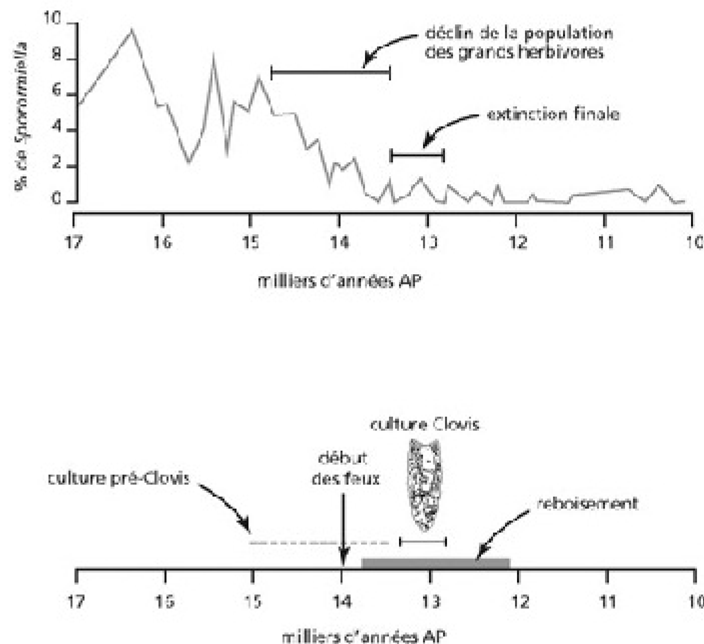
Le site classique de Clovis au Nouveau-Mexique, daté de 12 900 ans, livre quant à lui des restes de mammouths, associés à des pointes de lance. De fait, on ne trouve pas moins de 14 gisements de squelettes de mammouths qui montrent des traces incontestables d'abattage et de dépeçage par les chasseurs Clovis, les pointes de lance étant parfois logées à même les os. La découverte d'un tel nombre de charniers correspondant à un intervalle de temps aussi court – cinq siècles – est assez extraordinaire pour être soulignée. Le paléontologue Gary Haynes, de l'université du Nevada, remarque à juste titre qu'au cours des 10 000 ans qui suivent, on ne trouve pas un seul site de massacre de cerfs ou de bisons par les Amérindiens, ce qui met en relief le témoignage exceptionnel de cette chasse intensive pratiquée par les hommes de Clovis.

La coïncidence temporelle de la vague d'immigration humaine avec le déclin de la mégafaune américaine est particulièrement convaincante. On sait que l'immigration a débuté il y a environ 15 000 ans, avec notamment un site de dépeçage de mammouths dans le Wisconsin qui date de cette époque. De cette première apparition à la fin de la culture Clovis, deux millénaires et demi vont s'écouler durant lesquels 15 genres de grands mammifères vont disparaître du continent, et c'est un minimum : une vingtaine de genres supplémentaires disparaissent également, mais sans qu'on puisse encore dater leur fin assez précisément pour les classer dans cette fenêtre de 2 500 ans. Pour les 15 genres fermement identifiés comme disparaissant dans la fenêtre en question (il y a 15 000 à 12 500 ans), plus on affine les dates d'extinction, plus on se rend compte qu'elles se regroupent à la fin de la période, au cours des cinq siècles où la civilisation Clovis atteint son apogée, juste avant de péricliter.

On peut faire mieux encore dans l'établissement d'une chronologie, en traçant la courbe déclinante de la population des grands mammifères avant leur disparition, grâce à une méthode astucieuse. La géographe et climatologue Jacquelyn Gill de l'université du Wisconsin et son équipe ont misé sur un minuscule champignon dont les spores ont besoin pour éclore de passer à travers le système digestif des grands mammifères, mammouths compris. En recensant la quantité de ces spores au fil du temps dans les sédiments d'un lac (le lac Appleman dans l'Indiana), dont la pile couvre l'intervalle de temps courant de 17 000 à 8 000 ans avant le présent, Jacquelyn Gill a mis en évidence un déclin spectaculaire des spores de *Sporormiella* – le nom de ce précieux mouchard – à partir de 15 000 ans environ, ce qui coïncide avec l'arrivée de l'homme en Amérique du Nord. D'après le profil précis de ce déclin, la population des mammouths et autre mégafaune atteint ensuite son taux le plus bas il y a 13 700 ans, pour ne plus jamais se relever. Cette date n'est pas encore celle des extinctions, car on trouve encore des os de mégafaune

www.frenchpdf.com

datés de 13 000 à 12 000 ans, avant leur disparition finale, mais c'est en tout cas le timing de l'effondrement des populations animales.



Déclin de la mégafaune nord-américaine

La quantité de spores de microchampignons (*Sporormiella*) associés au système digestif des grands herbivores trahit un déclin de la mégafaune en Amérique du Nord, qui est synchrone avec l'arrivée des chasseurs (culture Clovis) (d'après C. Johnson, « Megafaunal decline and fall », *Science*, 326, 2009, p. 1073).

Les sédiments du lac ont d'autres histoires à nous raconter. On peut également y suivre l'évolution de la végétation grâce au pollen fossile : un changement très net intervient *après* l'effondrement de la mégafaune, avec l'essor du frêne noir et du charme, puis des forêts de pins et de chênes. Clairement, ce n'est pas le changement de végétation, dû par exemple au changement climatique, qui a causé l'effondrement de la mégafaune. Au contraire, il apparaît que c'est l'effondrement préalable de la mégafaune qui a ôté la pression exercée sur certains types d'arbres et changé la donne végétale.

La responsabilité de l'homme dans l'extinction de la faune en Amérique du Nord, suivie par un changement de végétation, est donc désormais bien engagée. En corollaire, le déclin de la culture Clovis peut s'expliquer par une baisse de sa population qui n'aurait plus disposé des mêmes réserves de nourriture après avoir exterminé son principal garde-manger, et surtout par un changement de mode de vie pour s'adapter au nouvel écosystème qu'il a inconsciemment œuvré à changer.

Un dernier sursaut climatique, qui succède à tous ces événements, a peut-être également contribué au changement de culture. Ce coup de froid final du Dryas récent, qui sévit de 12 900 à 11 500 ans environ et trouve sans doute son origine dans un changement de courant dans l'Atlantique Nord, ne semble pas déclencher l'extinction de la mégafaune nord-américaine, car le refroidissement se déclare bien après l'effondrement des populations de grands mammifères. Tout au plus peut-on supposer que lorsque la chute des populations a atteint un seuil critique et que les extinctions étaient déjà bien engagées, le coup de froid du Dryas récent n'a pas aidé les espèces encore survivantes : en réduisant leurs aires d'habitation d'un cran supplémentaire, il aurait favorisé les dernières embuscades des chasseurs.

La situation en Amérique du Sud confirme que le rôle du climat n'a pas été prépondérant. Si les soubresauts glaciaires ont bien affecté l'hémisphère Nord, leur influence sur l'hémisphère Austral est en effet bien moindre. Or c'est en Amérique du Sud (et aussi en Australie, comme on va le voir) que l'effondrement de la mégafaune est le plus ample. Pas moins d'une cinquantaine de genres y disparaissent, contre une dizaine seulement qui survivent, soit un taux d'extinction supérieur à 80 %. Sont ainsi rayés du registre animal le paresseux géant *Megatherium*, long de six mètres pour un poids de trois tonnes, et ses cousins de taille plus modeste ; des cousins des éléphants, comme le *Stegomastodon* et le *Cuvieronius* ; des brouteurs de la famille des chameaux, comme l'étrange *Macrauchenia* ; des équidés comme *Hippidion* ; et à terme les grands carnivores comme *Smilodon*, le tigre à dents de sabre.

www.frenchpdf.com

Là aussi, comme en Amérique du Nord, la végétation ne montre aucun signe de changement qui justifierait l'effondrement des populations animales, et par extension aucun rôle avéré du climat. En revanche, il est clair que les extinctions – en tout cas celles qui sont datées avec suffisamment de précision – coïncident avec l'arrivée de l'homme, dans la foulée immédiate de son implantation en Amérique du Nord, puisque sa présence au Chili et en Patagonie est déjà bien établie il y a 15 000 ans.

Nous n'irons pas plus loin dans notre incrimination de l'homme en Amérique du Sud, car les recherches et notamment les datations des extinctions sont encore préliminaires, mais à première vue le changement climatique semble hors de cause et l'homme reste à ce jour le seul suspect, avec une arrivée sur la scène du crime fâcheusement synchrone avec la disparition de la mégafaune.

Le scénario de la comète

Effet de mode, suite à la responsabilité prouvée de l'impact de Chicxulub dans le massacre des dinosaures ? Refus de vouloir accepter la responsabilité des hommes dans l'extinction de la mégafaune de l'âge glaciaire ? Ou les deux ? Toujours est-il qu'une équipe de chercheurs américains a fait grand bruit en publiant un livre en 2006, attribuant la fin de la mégafaune nord-américaine, et en parallèle de la culture Clovis, à l'impact d'une comète, il y a 12 900 ans, qui aurait brûlé les forêts, obscurci l'atmosphère et lancé le coup de froid du Dryas récent.

Les auteurs, avec à leur tête Richard Firestone et James Kennett des universités de Berkeley et de Santa Barbara en Californie, ont énoncé leurs arguments l'année suivante dans les revues scientifiques, les livrant au crible salutaire de la critique. Sur 50 sites archéologiques dispersés à travers le continent nord-américain, les chercheurs ont analysé des couches noirâtres, riches en carbone, qui contiendraient des concentrations anormalement élevées d'iridium, de microsphérules magnétiques, de suie et de charbon de bois, et même de microdiamants, qu'ils attribuent à la collision d'une comète.

Rapidement, toutefois, la contre-expertise par les spécialistes des impacts, notamment Philippe Claeys de l'université libre de Bruxelles, et par les archéologues spécialistes de la culture Clovis, tel Vance Holliday de l'université de l'Arizona, a relevé un grand nombre de failles dans les études menées. En répétant les analyses sur les mêmes sites, ils ont certes trouvé la plupart des indices avancés, mais pas dans les proportions préalablement mesurées, et surtout ils en ont trouvé un peu partout dans d'autres couches carbonées d'âges différents. La thèse d'un impact à un instant précis – la couche datée de 12 900 ans – est donc invalidée, et les concentrations d'iridium et de microsphérules supérieures à la moyenne dans cette multiplicité de couches noirâtres découleraient plutôt du mode de formation des couches en question.

Il s'agit de fines strates au sein de sédiments lacustres, qui se forment lorsque le ruissellement venu des berges et l'apport de sédiments terrigènes s'interrompent – en période d'aridité, par exemple – et que seules les fines particules apportées par le vent se déposent dans le lac. Ces fines poussières éoliennes contiennent naturellement un petit pourcentage de micrométéorites venues de l'espace : iridium et microsphérules s'accumulent en plus fortes proportions relatives, car non dilués par d'autres matériaux sédimentaires, et ressortent donc dans les analyses.

Quant aux hypothétiques feux de forêt déclenchés par l'impact, rien n'indique non plus que leur fréquence fût plus élevée il y a 12 900 ans qu'à d'autres époques. Sur la base de tous ces constats, la thèse d'un impact cosmique est donc écartée.

Le cas de l'Australie

L'homme se retrouve donc bien seul à la barre des accusés pour répondre des extinctions en Amérique du Nord et en Amérique du Sud. Reste le cas de l'Australie, qui apporte un dernier éclairage sur la question et ne plaide pas, là non plus, en faveur de l'homme.

L'Australie compte au départ moins de genres de grands mammifères que les Amériques – 16 pour être précis – mais détient le triste record du plus grand pourcentage d'extinctions : 14 genres sur 16, soit près de 90 %. Ces extinctions sont survenues au cours des derniers 80 000 ans, et la moitié ont un historique suffisamment détaillé pour restreindre la fourchette de leur disparition à un intervalle de 10 000 ans, de 50 000 à 40 000 ans avant le présent.

Tous les grands brouteurs australiens disparaissent, dont d'énormes marsupiaux comme le Diprotodon ; des kangourous géants au museau aplati ; et d'originaux carnivores marsupiaux, comme le *Thylacoleo carnifex* à tête de chat et queue de kangourou, qui ne pesait qu'une centaine de kilogrammes, mais avait une mâchoire aussi puissante que celle d'un lion. De fait, les seuls grands mammifères qui survivent en Australie aujourd'hui sont un genre de kangourou (*Macropus*) et le wombat.

Le débarquement de l'homme en Australie aurait débuté il y a au moins 55 000 ans, avec une population bien installée à partir de 45 000 ans environ, date des premiers sites archéologiques. Or c'est exactement à ce stade que la disparition de la majorité des espèces est observée.

www.frenchpdf.com

Tout comme en Amérique du Nord, on peut recenser les spores du champignon *Sporormiella* – qui se développent, on l'a vu, dans le tube digestif des grands herbivores – pour retracer le déclin de leurs populations. Les prélèvements effectués dans un lac du nord-est de l'Australie (Lynch's Crater, Queensland) attestent d'un effondrement de la mégafaune il y a 41 000 ans, âge qui correspond aussi à nombre d'extinctions notées à travers toute l'Australie.

On note par ailleurs qu'il n'y a pas de changement climatique notable avant ce déclin brutal, alors que plusieurs se sont succédé auparavant (il y a 75 000 ans et 55 000 ans notamment) qui n'ont eu aucun effet notable sur la mégafaune.

En jetant un coup de projecteur sur les sédiments qui enregistrent l'effondrement des populations animales il y a 41 000 ans, les auteurs de l'étude, avec à leur tête Susan Rule de l'université nationale d'Australie, signalent une nette augmentation des débris de charbon de bois un siècle *après* l'extinction de la mégafaune. Elle est suivie deux ou trois siècles plus tard par un changement durable de la végétation qui bascule des forêts et savanes vers un maquis d'arbustes aux feuilles coriaces, représentatif d'un climat plus aride.

Le scénario qui se dégage est donc le suivant : pour une raison qui n'a rien à voir avec le climat ou la végétation, la mégafaune s'effondre en premier. C'est alors sa disparition qui déséquilibre complètement l'écosystème : les grands herbivores ne défrichant plus la forêt, le bois mort s'accumule et des feux de forêt éclatent, cercle vicieux qui met en place une sécheresse à l'échelle continentale.

L'essor de la civilisation humaine en Australie, il y a 45 000 à 40 000 ans, expliquerait donc l'extinction de la mégafaune australienne, et par effet domino le changement de l'écosystème et du climat à l'échelle continentale.

Le verdict : l'homme coupable

Si l'opinion scientifique était très partagée dans les années 1980 et 1990, les travaux de plus en plus précis accomplis au début du XXI e siècle ont donc rejeté l'influence du climat et d'un changement hypothétique de végétation comme agents responsables des grandes extinctions de la fin de l'âge glaciaire, hormis peut-être en Europe où il pourrait avoir joué un rôle secondaire. Dans les Amériques et en Australie, l'homme reste le seul suspect, à travers la chasse organisée qu'il a pratiquée, de pair avec l'essor de sa population. Il a réduit les stocks des animaux pourchassés jusqu'à des niveaux ne permettant plus leur reproduction.

À ce titre, on commence à réaliser l'importance que revêt, pour la survie d'une espèce, son schéma de reproduction. On se rappelle que lors de la grande extinction de masse de la fin du Crétacé, les grands animaux comme les dinosaures ont été les plus touchés, aucune espèce dont les adultes dépassaient la barre des 25 kilogrammes n'ayant échappé au massacre. On a évoqué une cause en particulier : les populations naturellement restreintes de grands animaux, dont la chute du nombre d'individus mène plus rapidement à de basses densités critiques, en deçà desquelles les survivants n'interagissent pas suffisamment pour se reproduire.



www.frenchpdf.com

Défense de mammouth sur l'île de Wrangel au large de la Sibérie : les grands mammifères s'y sont éteints il y a 4 000 ans seulement, lorsque l'homme a finalement découvert leurs derniers refuges, longtemps après les avoir exterminés sur le continent. (© Hemis/Alamy Stock Photo.)

Lors de l'extinction de la mégafaune de l'âge glaciaire, on peut invoquer le même mécanisme – l'homme ayant remplacé l'astéroïde – en mettant l'accent sur un facteur aggravant face à ses assauts répétitifs : la lenteur du rythme de reproduction chez les grands animaux qui se reproduisent peu, et peu souvent. Pour prendre des exemples actuels, une lapine peut enchaîner quatre ou cinq portées de lapereaux par an (un mois de gestation seulement), alors qu'une éléphante n'accouchera que d'un seul éléphanteau au terme d'une gestation de vingt à vingt-deux mois. Décimées par la chasse, les espèces dont la gestation est longue peuvent difficilement reconstituer leurs stocks, le déséquilibre entre mortalité et natalité devenant vite catastrophique.

Dans une étude statistique des victimes et survivants chez les mammifères de l'âge glaciaire, Christopher Johnson de l'université de Tasmanie a ainsi conclu que la probabilité d'extinction d'une espèce a dépassé 50 % dès lors que le taux de reproduction pour une femelle était d'un seul nouveau-né par an, ou moins.

Les espèces affichant un tel taux de reproduction et qui ont néanmoins survécu, note Christopher Johnson, relevaient de milieux arctiques ou alpins, ou bien avaient un mode de vie arboricole ou nocturne. Cette sélectivité est particulièrement instructive, dans la mesure où elle exonère de nouveau le climat du massacre : si le climat était responsable, en quoi un mode de vie nocturne ou arboricole aurait-il protégé les espèces concernées d'un coup de froid, alors que les autres succombaient ? En revanche, ces modes de vie dissimulent mieux les individus des chasseurs qui traquent leurs proies majoritairement en plaine et en plein jour.

Deux autres constats d'ordre plus général vont dans le sens d'une exonération du climat dans l'extinction de la mégafaune. Le premier, c'est que la mégafaune s'est développée tout au long de l'âge glaciaire, durant plus de deux millions d'années, en survivant à une demi-douzaine de grands cycles de refroidissement – les glaciations de Biber, Donau, Günz, Mindel et Riss dans la nomenclature alpine – sans qu'il y ait extinction de masse des espèces. Seule la dernière glaciation (dite de Würm), dont rien n'indique qu'elle fut plus sévère que les autres, mais qui correspond à l'expansion mondiale d'*Homo sapiens*, voit s'effondrer la mégafaune.

Le second constat, c'est qu'il y a eu de petites populations de mégafaune qui ont survécu dans des lieux isolés des hommes, et pas ailleurs, alors que le climat n'y était pas foncièrement différent. L'exemple le plus connu est celui du mammouth qui a survécu sur la péninsule reculée de Taïmyr en Sibérie centrale et sur les îles inhabitées de Wrangel à l'extrémité orientale de la Sibérie et de Pribilof au large de l'Alaska. Devenus plus petits par adaptation à leur milieu restreint – le phénomène bien connu du nanisme – les derniers mammouths ne s'y sont éteints qu'il y a 4 000 ans (contre 12 000 ans ailleurs), très vraisemblablement lorsque les chasseurs ont finalement atteint ces contrées excentrées.

Le grand cerf ou *Megaloceros* s'est également replié dans des refuges, comme l'île de Man, entre l'Irlande et l'Écosse, et les montagnes de l'Oural, où il a survécu plusieurs milliers d'années à ses congénères plus exposés à la chasse, avant de disparaître pour de bon, il y a environ 5 000 ans. Même constat pour le paresseux géant, d'abord extirpé du continent américain, mais qui a survécu dans les Antilles jusqu'à l'arrivée des hommes, il y a 5 000 ans également.

Devant tant d'indices convergents, la responsabilité principale de l'homme dans l'extinction de la mégafaune est désormais difficile à nier. On comprend toutefois qu'il y ait des réticences chez certains à accepter ce verdict : d'une part parce qu'en science le doute est salutaire et indispensable, et qu'il faut toujours rester critique, mais aussi parce que s'opposer à une théorie qui gagne en crédibilité et atteint peu à peu un consensus permet de se distinguer des autres chercheurs et de s'attirer une certaine visibilité médiatique. On l'a vu pour la fin des dinosaures ; on le reverra dans le cas du réchauffement climatique avec la charge des climato-sceptiques ; on le voit ici avec l'extinction de la mégafaune.

Dans ces deux derniers exemples, il y a également une réticence à incriminer l'homme, parce que cela incommode notre conscience, et surtout parce que cela touche à notre modèle économique, à partir du moment où il faudrait se restreindre dans l'exploitation des ressources de la Terre, qu'elles soient animales, végétales ou minières. On comprend ainsi que toute thèse qui nie l'influence de l'homme sur la dégradation de son environnement trouve une certaine caisse de résonance et un appui tacite, médiatique et parfois même financier, auprès de certains groupes conservateurs.

Ainsi, on lira encore longtemps que l'homme n'est pas coupable de l'extinction de la mégafaune. Mais les preuves s'accumulent et la défense de l'homme est de moins en moins tenable. Aujourd'hui, tout semble au contraire indiquer que ce premier massacre est le coup d'envoi de la grande extinction de masse que l'espèce humaine a déclenchée lorsqu'elle a commencé son expansion à travers le monde. Si elle était restée singulière et isolée, cette extinction de la mégafaune aurait déjà constitué un événement majeur dans l'histoire de la vie sur Terre. Mais l'homme, hélas, n'en est pas resté là.

www.frenchpdf.com

5

Ampleur des extinctions actuelles

Si quelques minces interrogations demeurent encore sur le rôle exact de l'homme dans la disparition de la mégafaune à la fin de la dernière période glaciaire, aucun doute ne subsiste en revanche sur sa responsabilité directe dans les vagues d'extinctions ultérieures qui ont accompagné l'essor de la civilisation.

Au sortir de cet âge de glace, le déclin des espèces animales, face à l'expansion humaine, est d'abord resté relativement discret. Sur les continents déjà colonisés, la plupart des espèces vulnérables – celles des gros animaux à lente reproduction en particulier – avaient déjà été exterminées, de sorte que la biodiversité apparente a longtemps plafonné sans signe nouveau d'appauvrissement. Quant aux petits animaux, comme ils comptent de nombreux individus qui se reproduisent rapidement, même si leurs populations ont pu considérablement chuter devant la pression de la chasse et de la déforestation, leur existence en tant qu'espèce n'est pas immédiatement menacée.

Le rôle de l'homme dans les extinctions éclate au grand jour avec la colonisation progressive des îles qui constituent autant d'écosystèmes fermés, avec des populations animales et végétales limitées par la surface disponible – des écosystèmes qui sont donc particulièrement fragiles. Or ces écosystèmes insulaires nous apportent un précieux témoignage.

On rappellera l'exemple de la petite île arctique de Wrangel, à 140 kilomètres des côtes de la Sibérie, de la taille d'un département français. On y a trouvé de nombreux fossiles de mammouths laineux de petite taille, dont les derniers spécimens sont datés de 4 000 ans seulement (2 000 ans av. J.-C.), c'est-à-dire qu'ils ont survécu sur l'île des milliers d'années après avoir été exterminés ailleurs. Leurs ancêtres ont sans doute atteint l'île à la dérive ou en nageant (les éléphants sont de bons nageurs), et la diminution de leur taille fut une conséquence logique des ressources alimentaires limitées dans une île arctique, jumelées à l'absence de prédateurs qui rendait inutile leur grande masse.

Cette absence de prédateurs prit fin il y a 4 000 ans, puisque l'extinction du mammouth nain de Wrangel est contemporaine des premières traces de présence de l'homme sur le territoire. Le climat et la végétation n'ayant connu aucun changement radical à cette époque, nos chasseurs restent seuls responsables d'un carnage facile.

De même, on rappellera la survie dans les Antilles de plusieurs espèces de grands paresseux terrestres, plusieurs milliers d'années après leur disparition des Amériques : c'est en effet il y a 5 000 ans seulement que *Neocnus rodens* et *Megalocnus rodens* disparaissent d'Haïti et de Cuba respectivement, à une époque où aucun changement climatique n'est décelé dans l'analyse des sédiments insulaires. Or les premières traces de présence humaine sur ces îles remontent à 6 000 ans environ, et sont suivies d'une baisse du pollen des essences forestières et d'une hausse des particules de charbon, signe que l'homme détruit l'environnement. Directement par la chasse ou indirectement par son action incendiaire, celui-ci est donc tenu responsable d'une vague d'extinctions qui mettra environ un millénaire à venir à bout de tous les paresseux[1], mais aussi de tous les primates des Grandes Antilles – quatre espèces de singes – et des trois quarts de toutes les espèces de rongeurs et mammifères insectivores de l'archipel.

Madagascar et Nouvelle-Zélande

Deux exemples encore plus parlants, particulièrement bien étudiés et qui affectent un très grand nombre d'espèces, sont ceux de Madagascar et de la Nouvelle-Zélande.

Au large de l'Afrique de l'Est, l'île de Madagascar a une superficie proche de celle de la France. Elle n'est séparée du continent africain que par un détroit de 400 kilomètres de large (le « canal » du Mozambique), mais suffisant pour longtemps l'isoler de l'influence humaine : les premiers chasseurs ne débarquent dans l'île qu'il y a 2 000 ans à peine. Or, à partir de cette date, six espèces d'oiseaux géants ou « oiseaux-éléphants » vont disparaître, plus gros que des autruches et chassés pour leurs œufs, dont la dernière espèce s'éteint vers 1650 et qui deviendra d'ailleurs la vedette d'une nouvelle de H. G. Wells : *L'Île de l'Aepyornis*. Disparaissent aussi 17 espèces de lémuriens, dont le plus gros représentant avait la taille d'un gorille, deux espèces d'hippopotames, deux espèces de tortues géantes, ainsi qu'un genre rarissime de gros fourmilier et un carnivore ressemblant à une grosse mangouste. En bref, la totalité de tous les animaux malgaches de plus de 10 kilogrammes disparaissent.

Pour cette malheureuse mégafaune qui rejoint au cimetière des espèces disparues celles des Antilles, aucune influence du climat ou changement naturel du couvert végétal ne peuvent être invoqués pour disculper l'homme.

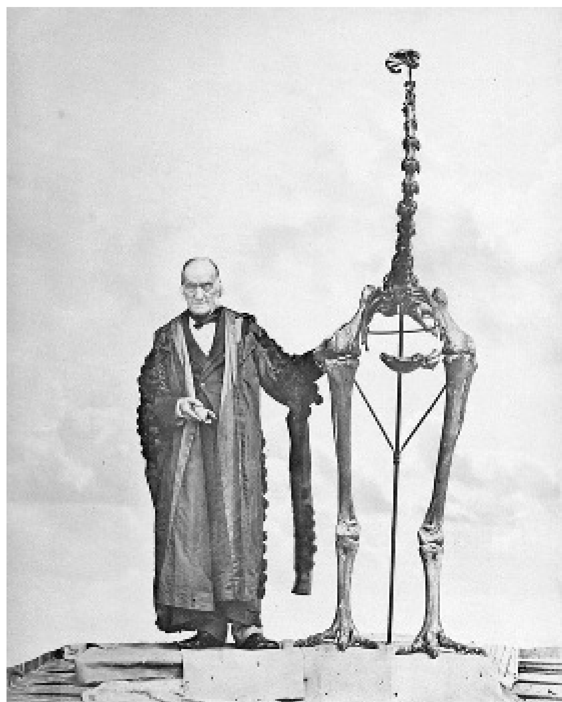
www.frenchpdf.com

Une étude détaillée des sédiments malgaches montre d'ailleurs, comme ce fut le cas en Amérique du Nord et en Australie, que les spores des plantes et la multiplication des feux de brousse, qui trahissent un changement de la végétation, *suivent* la vague d'extinctions, plutôt qu'ils ne la précèdent. La végétation n'a donc pas changé de manière à mettre en péril les espèces : c'est au contraire la mort des espèces qui a mené à la détérioration de la végétation, détérioration que l'homme a par la suite certainement aggravée.

Dans cette vague d'exterminations qui court d'île en île à mesure que l'homme conquiert le monde, le champ de bataille suivant est la Nouvelle-Zélande.

Isolée de l'Australie par une étendue océanique large de 1 500 kilomètres, la Nouvelle-Zélande n'a été colonisée par les Polynésiens (ou Māoris) qu'à la fin du XIII [e] siècle. Elle présente la triste particularité d'être le dernier endroit sur Terre à voir sa mégafaune massacrée, à une époque où, là encore, aucun changement climatique notable ne peut être invoqué pour disculper l'homme. Ce ne fut pas faute d'essayer, les avocats d'*Homo sapiens* ayant redoublé d'ingéniosité pour trouver des circonstances atténuantes au massacre des espèces insulaires.

Le constat est pourtant sans appel, symbolisé par la disparition du moa, un oiseau géant dont les squelettes furent découverts par les navigateurs européens lorsqu'ils débarquèrent sur l'île à la fin du XVIII [e] siècle.



En 1839, le paléontologue britannique Richard Owen identifia un os fossile, provenant de Nouvelle-Zélande, comme appartenant à un oiseau géant, récemment éteint. Il pose ici en 1879 devant le squelette du moa reconstitué. (© Tiré de Richard Owen, *Memoirs on the Extinct Wingless Birds of New Zealand*, vol. 2, Londres, John van Voorst.)

Le moa avait de quoi impressionner : au terme de 60 millions d'années d'évolution, cette lignée unique au monde s'était diversifiée au point de compter, lorsque les Māoris s'installèrent, neuf espèces différentes, dont les deux plus grandes dépassaient trois mètres de haut (tête redressée) pour un poids de 200 kilogrammes, soit des dimensions légèrement supérieures à celles d'une autruche. Totalement dépourvues d'ailes – sur une île sans prédateur naturel, hormis un aigle local – les moas furent une proie facile pour les chasseurs fraîchement débarqués, à en croire les tas d'ossements trouvés sur de nombreux sites māoris : tant leur viande que leurs œufs étaient prisés, ce qui ne leur laissait aucune chance de survie.

Comme dans les autres exemples de massacres rencontrés jusqu'à présent, on a longtemps hésité à incriminer l'homme. Des éruptions volcaniques furent invoquées – la Nouvelle-Zélande étant bien pourvue en volcans – tout comme un impact venu du ciel, à l'instar de celui qui dévasta les forêts sibériennes de la Toungouska en 1908 et qui aurait déclenché des incendies à grande échelle[2]. Pour parachever cette comparaison avec la fin des dinosaures, certains chercheurs ont également émis l'hypothèse que les grands oiseaux sur l'île étaient en pleine dégénérescence au moment du débarquement des Māoris, ceux-ci n'ayant fait que porter le coup de grâce à des espèces qui ne demandaient qu'à s'éteindre.

À la lumière des dernières études sur le terrain, la vérité est tout autre. Une équipe dirigée par Morten Allentoft du Muséum d'histoire naturelle de Copenhague a prélevé du matériel génétique sur les ossements de 300 oiseaux

www.frenchpdf.com

appartenant à quatre espèces éteintes de moas – échantillonnage qui couvre un intervalle de temps de 12 000 ans – et conclu qu'il n'y a eu aucune baisse de leur diversité génétique ni de leur nombre au cours de leurs derniers millénaires d'existence : les moas se portaient à merveille jusqu'à leur fin aussi brève que brutale.

On estime en effet à près de 60 000 le nombre de moas lorsque les Māoris débarquèrent sur l'île vers 1280 apr. J.-C. De récentes datations au carbone 14 indiquent que leur massacre fut conduit en moins d'un siècle, encore plus rapidement que les estimations les plus radicales avancées jusqu'alors.

Mais ce n'est hélas pas tout. Les neuf espèces de moas ne furent pas les seules à disparaître. D'autres grands oiseaux furent exterminés en un temps à peine plus long, sans doute moins de deux siècles : l'aigle de Haast, qui devait se nourrir en partie de jeunes moas (donc vraisemblablement une victime collatérale de leur massacre) ; deux oies locales de grande taille (un mètre de haut et près de 20 kilogrammes : on imagine le festin) ; deux espèces d'oiseaux carnivores (*Aptornis*) aux pattes robustes, ailes atrophiées et large bec ; et six espèces de canards. Tous ces grands oiseaux constituaient la totalité de la mégafaune néo-zélandaise, aucun grand mammifère ni reptile n'ayant vécu sur ces îles.

Outre le fait qu'elle fut le dernier théâtre sur Terre d'un massacre de la mégafaune, la Nouvelle-Zélande se distingue aussi pour avoir essuyé en même temps le massacre de sa faune ordinaire, à la différence de ce qui s'était passé en Australie ou dans les Amériques. Car en dehors de la chasse, un facteur supplémentaire de dévastation a accompagné le débarquement des Māoris, à savoir les rats.

Passagers clandestins, ces rats du Pacifique ont pu s'attaquer aux nids des autres espèces d'oiseaux qui n'intéressaient pas les chasseurs, oiseaux habitués à nicher à terre puisqu'ils ne connaissaient pas de prédateurs. La situation empira singulièrement lorsque les Européens débarquèrent à leur tour à la fin du XVIII e siècle avec leurs propres bataillons de rats, chats, hermines, belettes et furets. Se reproduisant à vive allure, ces prédateurs décimèrent non seulement les oiseaux, mais aussi les petits amphibiens et reptiles, et l'une des trois espèces endémiques de chauves-souris – seules représentantes de la classe des mammifères en Nouvelle-Zélande.

On ne saura sans doute jamais combien d'espèces uniques de lézards et de geckos furent éradiquées, mais certaines sont emblématiques, tel le gecko géant ou *kawekaweau*. Dans la légende māori, il représentait l'âme des ancêtres disparus, ainsi qu'un mauvais présage pour quiconque poserait les yeux sur lui. Est-ce pour cette raison que le dernier individu signalé en 1870 par un chef māori fut prestement occis par ce dernier, sans que sa dépouille ne soit exhibée ? On s'est longtemps demandé si l'animal n'était pas tout simplement un mythe, jusqu'au jour où Alain Delcourt, conservateur des reptiles au Muséum d'histoire naturelle de Marseille, trouva dans le sous-sol du musée un gecko empaillé de 60 centimètres de long, dont il diffusa la photographie. Identifié en 1986 par les spécialistes américains Bauer et Russell comme étant bien le légendaire *kawekaweau* de Nouvelle-Zélande – un exemplaire vraisemblablement rapporté à Marseille par les explorateurs français au début du XIX e siècle – le gecko géant est devenu le logo du muséum, et son « promoteur » Alain Delcourt est honoré dans le nom d'espèce donné au défunt animal : *Hoplodactylus delcourti*.

Si l'on est sans doute loin de connaître la liste complète des reptiles massacrés en Nouvelle-Zélande, la bonne nouvelle est que plusieurs dizaines d'espèces de lézards et de geckos ont survécu au large des deux grandes îles, sur des îlots où l'homme et son armée de carnivores ont omis de débarquer. Mais pour combien de temps encore ?

À l'heure de faire le bilan pour la Nouvelle-Zélande, et en commençant par les oiseaux grands et petits, on dénombre 51 espèces massacrées, dont 38 au tableau de chasse des Māoris et 19 sur le compte des Européens. Il s'agit d'un minimum, car on ne cesse de découvrir des espèces éteintes, grâce notamment aux déjections « fossiles » des hiboux, qui nous procurent des ossements de petits oiseaux ayant autrefois constitué leur repas et qui ont aujourd'hui disparu.

La difficulté dans les bilans, c'est en effet que l'on passe à côté d'espèces exterminées parce qu'aucune description ou recensement n'en ont été faits à temps : cela vaut surtout pour les espèces diminutives aux restes fragiles, comme les petits oiseaux et reptiles, les amphibiens, les invertébrés, les plantes. Certaines laissent néanmoins un souvenir impérissable – le mot est cruel – parce qu'elles étaient justement remarquables, belles, voire vénérées.

En Nouvelle-Zélande, ce fut le cas du huia, oiseau au plumage d'un noir luisant, aux reflets vert sombre, marqué d'une bande blanche au bout de la queue et d'une touche de vermillon sous le bec. Les plumes étaient prisées des Māoris, ce qui a contribué à leur déclin, mais ce sont surtout les campagnes de déforestation des Européens à des fins agricoles qui ont exterminé l'espèce, ainsi qu'un dernier facteur souvent passé sous silence : l'avidité des collectionneurs.

On ne saurait en effet sous-estimer, dans les vagues d'extinctions qui dévastent la biosphère, le rôle des collectionneurs, qu'ils soient chasseurs de papillons ou empailleurs d'oiseaux. L'effet est d'autant plus pernicieux que plus une espèce devient rare, plus elle est prisée, ce qui fait monter les prix et la pression sur les derniers spécimens de l'espèce. À une époque où la préservation de l'écosystème ne figurait pas dans les priorités, les musées d'histoire naturelle ont été aussi coupables que les collectionneurs privés. Dans le cas du huia de Nouvelle-Zélande, ces institutions étaient prêtes à payer de belles sommes pour des spécimens empaillés, encourageant un trafic mortel. Ainsi, un taxidermiste autrichien s'est distingué en tuant 212 couples de huias en l'espace de dix ans

www.frenchpdf.com

pour le muséum de Vienne, et il ne s'agit que d'un exemple[3].

Les derniers huias, au nombre de trois, furent aperçus dans une forêt de York Bay, le 22 décembre 1922. Deux autres témoignages assez crédibles signalent un ou deux individus près du lac Waikareiti en 1961 et en 1963. Plus de cinquante ans se sont écoulés depuis, de sorte qu'aujourd'hui l'espèce est officiellement éteinte, ou, devrait-on dire plus honnêtement, exterminée.

En traduisant toutes ces pertes en pourcentages, et le bilan n'est que provisoire, la Nouvelle-Zélande a perdu depuis l'arrivée de l'homme plus de 40 % de tous ses oiseaux, le même nombre pouvant être avancé pour toutes ses espèces de vertébrés en général.

S'il est particulièrement spectaculaire, le cas de la Nouvelle-Zélande est loin d'être unique. Pis, c'est un modèle représentatif de la vague d'extinctions qui déferle sur la planète depuis que l'homme s'y répand et s'y multiplie, et dont les oiseaux sont le vivant, ou devrait-on dire le moribond symbole.

Comment massacrer les oiseaux

Les grands voyages de découverte autour du globe, amorcés au début du XV[e] siècle et qui culminent dans les années 1700 et 1800 avec James Cook et Charles Darwin, ont eu deux effets diamétralement opposés. Ils ont mené à la découverte de nouvelles espèces et conduit Darwin à élaborer sa théorie de l'évolution sur la base de ses observations, notamment sa célèbre étude des pinsons des îles Galápagos.

Le second effet, c'est la destruction de ces mêmes espèces à peine découvertes, à force d'envahir leurs fragiles habitats et de les exploiter sans retenue, principalement pour leur viande ou pour les collectionneurs. En même temps qu'il découvrait les lois de l'évolution par l'observation et la théorie, l'homme découvrait le concept d'extinction par la pratique.

On l'a vu à travers les exemples précédents : les îles sont de fantastiques réservoirs de biodiversité, d'espèces originales qui y ont évolué à l'écart des grands écosystèmes continentaux, mais les espèces en question sont particulièrement fragiles parce qu'elles n'ont pas connu de prédateurs et sont sans défense lorsque débarquent l'homme et ses animaux de compagnie.

Tous les archipels ont connu ce fléau, mais il est utile de rappeler le cas historique du dodo de l'île Maurice.

Au large de Madagascar dans l'océan Indien, l'île Maurice mesure moins de 2 000 kilomètres carrés – une superficie comparable à celle de l'île de la Réunion – et n'avait pas reçu la visite de l'homme, hormis quelques courtes escales de navigateurs arabes et portugais, avant les premiers débarquements des Hollandais à la fin du XVI[e] siècle. Gros et gras, incapable de voler, faisant partie de la famille du pigeon et pesant jusqu'à 20 kilogrammes, le dodo (*Raphus cucullatus*) devint rapidement la proie des navigateurs en quête de chair fraîche. Chats et chiens débarqués participèrent à ce carnage, lequel fut aggravé en outre par la déforestation.

Le massacre fut conduit à une vitesse éclair. Le premier dodo fut décrit par un navigateur hollandais en 1598 ; le dernier à avoir été abattu par un chasseur fut consigné en 1688. En moins d'un siècle, l'espèce était exterminée au point que les naturalistes européens se demandèrent si l'oiseau avait bel et bien existé ou n'était qu'une fabulation des navigateurs, malgré les croquis et les toiles en couleurs réalisés lors de ces expéditions.

www.frenchpdf.com



Figure emblématique des extinctions causées par l'homme, le dodo de l'île Maurice fut esquissé par les navigateurs hollandais au début du XVIIe siècle, avant sa disparition brutale quelques décennies plus tard. Cette esquisse de 1626, attribuée à Adriaen Van de Venne, est conservée à la bibliothèque de l'université d'Utrecht aux Pays-Bas.

Qu'un oiseau aussi remarquable ait été découvert puis exterminé en un temps si court a choqué les esprits, mettant en avant l'inconfortable concept d'extinction, à tel point qu'il était rassurant d'invoquer la « bêtise » de l'animal et de le considérer inadapté pour expliquer sa disparition, à l'image des dinosaures autrefois. De fait, dans la culture anglo-saxonne, « suivre le même chemin que le dodo » (*to go the way of the dodo*) signifie devenir obsolète, tout comme on dit chez nous « devenir un dinosaure ».

Pourtant, ni l'un ni l'autre n'étaient mal adaptés à leur environnement, bien au contraire. C'est un agent extérieur d'une puissance hors norme – un astéroïde dans le premier cas, l'homme dans l'autre – qui a eu raison d'espèces méritant tout à fait de vivre.

Que des espèces rares et insulaires, comptant peu d'individus, succombent au débarquement d'hommes peu regardants et devant impérativement se nourrir, pourrait passer aux pertes et profits des grands voyages de découverte et ne représenter que des anecdotes cantonnées à de petites îles aux écosystèmes naturellement fragiles, sans que cela présage d'extinctions à grande échelle capables de toucher un continent ou la Terre entière. C'est sous-estimer la force destructrice de l'homme, et là pour en témoigner – ou plus précisément plus là pour en témoigner – se dresse le cas hallucinant du pigeon migrateur.

Hallucinant est le mot, tellement cet oiseau nord-américain, appelé aussi tourte ou colombe voyageuse (*Ectopistes migratorius*)[4], se déplaçait en nuées énormes qui laissaient les observateurs pantois. Nomade, sans domicile fixe, l'oiseau migrait en groupes de plusieurs millions, voire plusieurs milliards d'individus. Oui, vous avez bien lu : *milliards*. Un beau jour de 1866, sur les rives du lac Ontario, une nuée de pigeons migrateurs large de plus d'un kilomètre a survolé les observateurs sans discontinuer pendant près de 15 heures, correspondant à une longueur de 500 kilomètres et une population estimée à plus de trois milliards d'individus.

C'était donc en 1866. Moins de cinquante ans plus tard, le 1er septembre 1914, le dernier pigeon migrateur de la planète s'éteignait au zoo de Cincinnati dans l'Ohio. Nouveau record battu pour la rapidité d'une extinction aux mains de l'homme, extinction d'autant plus choquante qu'il s'agissait d'une espèce d'ampleur continentale, riche de milliards de membres.

Comment l'homme a-t-il pu exterminer une espèce aussi féconde en un laps de temps aussi court, sans même l'aide de la pollution ou du réchauffement climatique ?

Tout simplement par la chasse.

Le pigeon représentait un fléau pour les agriculteurs, dévastant les champs de céréales, et il constituait une source de viande à bon marché, notamment pour les esclaves et les pauvres. Son déplacement migratoire le distribuait «

www.frenchpdf.com

gratuitement » à travers de nombreux États, du Canada à la Floride en passant par les provinces des Grands Lacs où les nuées venaient nicher dans les forêts de chênes blancs. C'est là qu'il était particulièrement vulnérable, chaque chêne pouvant accueillir des centaines d'oiseaux : il suffisait de tirer à la chevrotine dans un arbre, un seul coup de fusil à double canon pouvant en abattre une cinquantaine à la fois. D'autres chasseurs moins scrupuleux abattaient tout simplement l'arbre, voire le faisaient tomber sur l'arbre voisin pour faire coup double, ou alors lui mettaient le feu.



À la fin du XIX e siècle, le pigeon migrateur des États-Unis a été massacré par les chasseurs. Malgré une population qui se comptait à l'origine en milliards d'individus, il a perdu sa dynamique de reproduction et s'est éteint au début du XX e siècle. Gravure sur bois, tirée de *The Illustrated Shooting and Dramatic News*, 1875. (© North Wind Picture Archives.)

Le marché de la viande de pigeon explosant avec l'approvisionnement des villes par chemin de fer, les techniques de chasse devinrent proprement industrielles, de grands filets en tunnel pouvant capturer jusqu'à 3 500 pigeons à la fois. On rapporte ainsi qu'au printemps 1878, à Petoskey dans le Michigan, 50 000 oiseaux furent tués *chaque jour* pendant près de cinq mois. Faites le calcul : en moins d'un semestre, cela représente sept millions d'oiseaux massacrés sur une seule commune. Du reste, si dans l'exemple précédent du huia néo-zélandais on pouvait s'émouvoir à l'idée d'un taxidermiste qui avait occis plus de 400 oiseaux en une décennie, que dire de ce chasseur du Michigan qui trucida à lui seul *trois millions* de pigeons migrateurs au cours de sa carrière ?

Du million au milliard, il n'y a qu'un pas sur la route de l'extermination. Mais on peut tout de même se demander comment, avec une telle population au départ, une espèce aussi prolifique n'a pas réussi à survivre, d'autant que la chute de sa population aurait dû à terme rendre les techniques de chasse moins rentables et faire augmenter le prix de revient de l'animal, jusqu'à stabiliser sa population autour d'un seuil minimal, mais non nul. C'est le cas, on le verra plus tard, pour certains types de poissons soumis à une pêche intensive.

Pour le plus grand malheur du pigeon migrateur, toutefois, un autre effet de seuil a joué, non pas de stabilisation, mais au contraire d'effondrement terminal de sa population. Il tient au mode de reproduction. On l'a déjà évoqué pour les dinosaures et la mégafaune : en deçà d'une certaine densité de population, les individus n'arrivent pas à se localiser, ou ne retrouvent pas les conditions stimulantes d'un troupeau ou d'une nuée pour se reproduire. Dans le cas du pigeon migrateur, déplacements et reproduction s'effectuaient en masse – un comportement caractéristique de l'espèce et qui avait certainement sa raison d'être, au point que la chute de la population entrava l'efficacité de la reproduction : un cercle vicieux qui mena à une extinction éclair.

C'est ce que démontre la fin de l'histoire. Lorsqu'à la fin du XIX e siècle – entre 1870 et 1890 précisément – les chasseurs et les protecteurs de l'environnement (mouvement qui venait de naître) s'aperçurent que les stocks de pigeons migrateurs s'effondraient, il était trop tard. Malgré les efforts de dernière minute pour secourir l'oiseau, notamment la capture de plusieurs groupes pour un élevage en captivité dans les zoos et les muséums, le pigeon migrateur avait perdu sa dynamique de reproduction. Le dernier représentant officiel de l'espèce, dénommé Martha, expira le 1er septembre 1914 au zoo de Cincinnati dans l'Ohio. Une statue fut d'ailleurs érigée à sa mémoire : si le geste ne ressuscitera pas l'espèce, il a au moins pour mérite de marquer pour les visiteurs du zoo la réalité d'une extinction.

Dans son guide des oiseaux nord-américains, Paul Ehrlich résume ainsi ce drame qui est loin d'être un cas isolé : « Voilà qui illustre un principe important de la conservation de la biodiversité : il n'est pas toujours nécessaire de tuer le dernier couple d'une espèce pour la forcer à s'éteindre[5]. »

www.frenchpdf.com

Extinction des oiseaux : où en sommes-nous ?

On le voit : les oiseaux sont en première ligne de la vague d'extinctions que l'homme fait déferler sur le monde aujourd'hui. Pour cerner l'ampleur de cette vague et déterminer si nous allons la hisser au même niveau de destruction que les quatre ou cinq autres grandes extinctions de masse de l'histoire de la Terre, commencer notre recensement par les oiseaux est particulièrement symbolique.

Après tout, les oiseaux sont apparentés aux dinosaures et sont en quelque sorte leur seule branche rescapée du massacre de la fin du Crétacé, il y a 66 millions d'années. Après avoir ressurgi de leurs cendres, tel le phénix mythique, vont-ils de nouveau s'effondrer au point de risquer disparaître une bonne fois pour toutes de la surface du globe ?

Les oiseaux méritent de lancer notre grand recensement des espèces en danger pour une autre raison. Ils sont particulièrement bien étudiés, et on peut donc présumer que l'on a identifié plus de 95 % des espèces en vie actuellement, ainsi que celles qui ont récemment disparu, ce qui permet d'obtenir des statistiques précises.

Pour ce qui est du nombre de base – celui des espèces d'oiseaux existants – il reste encore une toute petite marge d'imprécision, relative à des problèmes de classements de certains oiseaux entre espèces et sous-espèces[6], ainsi qu'au fait qu'une cinquantaine d'espèces nouvelles sont encore découvertes chaque année, mais on tourne autour du chiffre rond de 10 000 espèces d'oiseaux en vie à l'heure actuelle[7], ce qui a le mérite de simplifier les calculs lorsqu'il est question de déterminer des pourcentages.

Venons-en maintenant au nombre d'espèces qui se sont éteintes durant les temps historiques, c'est-à-dire décrites vivantes par les naturalistes, puis dont la disparition a été constatée (on prend comme date de départ de ces temps « historiques » l'an 1500, date à partir de laquelle on a des descriptions fiables). Le total tourne autour de 160 espèces disparues – série en cours. Dans l'absolu, cela peut paraître tout à fait modeste : 1,6 % du stock mondial des espèces aviaires.

Dans le détail, on notera qu'avec une soixantaine d'espèces exterminées, la Nouvelle-Zélande se taille la part du lion (si l'on peut dire). En seconde position vient l'archipel des îles Hawaï avec près d'une trentaine de victimes, dont des foulques et autres rallidés, nombre de passereaux butineurs de nectar, et un corbeau. Les îles, comme on l'a vu, sont très exposées aux massacres en raison de l'étroitesse de leurs habitats et de l'agression des rats et autres prédateurs débarqués par l'homme, quand ce n'est pas de l'homme lui-même. De fait, ce n'est qu'à partir des années 1800 que des espèces continentales commencent à mordre la poussière, avec trois espèces éteintes au XIXe siècle et une douzaine d'espèces (dont notre tristement célèbre pigeon migrateur) au XXe siècle.

Au passage, si l'on précise que 20 % de toutes les espèces aviaires habitent des îles et 80 % des continents, et qu'environ 150 espèces exterminées l'ont été dans les îles, celles-ci affichent un taux d'extinction plus élevé que la moyenne : près de 8 % (150 espèces sur 2 000). Ce nombre-là commence à devenir inquiétant.

La seconde raison d'inquiétude, c'est que ces nombres ne peuvent que croître. Une vingtaine d'espèces d'oiseaux ont disparu entre 1975 et 2000, et s'il est encore trop tôt pour faire le bilan de la tranche 2000-2025, on compte déjà une demi-douzaine d'extinctions au XXIe siècle : pour les seules îles Hawaï on déplore la disparition des jolis passereaux à tête jaune O'u et Nukupu'u, et du Po'o-uli masqué de l'île de Maui, dont le dernier individu est mort en captivité le 28 novembre 2004.

En première approximation, on peut donc dire qu'une espèce d'oiseau disparaît désormais tous les deux ans en moyenne.

Pour mettre ce taux en perspective, on peut le comparer au taux d'extinction « naturel » des oiseaux, en dehors de toute influence humaine. On a recours pour cela à l'étude des fossiles d'oiseaux : la durée de vie d'une espèce aviaire est d'environ un million d'années. Appliqué à l'ensemble de nos 10 000 espèces actuelles, cela veut dire qu'une espèce disparaît *naturellement*, en moyenne, tous les siècles[8]. Comme l'homme extermine une espèce tous les deux ans, notre massacre se déroule donc à un taux *cinquante fois plus rapide* que le processus naturel.

Voilà pour ce qui est de la situation actuelle. Doit-on s'en inquiéter ? Les optimistes pourront se rassurer du fait que nous n'en sommes qu'à 1,6 % d'extinctions aviaires aujourd'hui, et que même en éliminant une cinquantaine d'espèces d'oiseaux par siècle, il nous reste 10 000 ans à ce rythme avant d'atteindre le niveau des grandes extinctions en masse des temps géologiques (disparition de 50 % des espèces ou plus). Nos descendants trouveront bien la parade d'ici là, et entre-temps nous n'aurions pas à changer notre façon de vivre.

Mais d'ores et déjà, il faut émettre deux réserves à ce bilan. La première est de se demander si nous avons bien recensé toutes les espèces d'oiseaux que nous avons massacrées. Ce nombre de 160 espèces défuntes est par définition un minimum qui se limite, on l'a vu, aux observations des naturalistes, puis des biologistes au cours des cinq derniers siècles. Combien d'autres espèces ont disparu au cours des quatre ou cinq siècles précédents, lorsque les Polynésiens ont rayonné à travers le Pacifique, sans description historique de ce qu'ils trouvaient, puis ne trouvaient plus ? Et même lorsque les naturalistes sont arrivés sur place, ont-ils pu cataloguer les espèces dont les

www.frenchpdf.com

derniers membres s'éteignaient discrètement, hors de leur champ de vision ? Un oiseau moribond ou un squelette d'oiseau est en effet beaucoup plus difficile à repérer qu'un oiseau bien vivant qui vole, chante et se laisse dessiner.

Richard Duncan, Alison Boyer et Tim Blackburn de la Société zoologique de Londres se sont attaqués à ce problème. En recensant les ossements d'oiseaux inconnus sur une quarantaine d'îles du Pacifique et en faisant des interpolations pour couvrir les zones où il est difficile de trouver de tels restes, les chercheurs ont tenté d'estimer le nombre d'oiseaux terrestres (c'est-à-dire oiseaux de mer et passereaux exclus) qui n'ont laissé que de discrets ossements, mais aucune trace historique lors des premières immigrations humaines sur ces îles.

En extrapolant ce facteur correcteur – que l'on pourrait appeler le « facteur fantôme » – à toutes les îles non couvertes dans son étude, l'équipe de Londres avance que près de *mille* espèces d'oiseaux furent exterminées à travers le Pacifique. En y ajoutant les autres catégories d'oiseaux moins vulnérables que ceux vivant à terre (appelons-les « OVNI » : oiseaux volants non identifiés), le bilan atteindrait près de 1 300 espèces massacrées, bien plus que les 160 espèces défuntes officiellement reconnues.

Ce calcul statistique paraît solide, et tous ces fantômes qui se pressent en coulisse font singulièrement grimper le pourcentage des espèces aviaires disparues dans les temps historiques. Celui-ci ne serait pas de 1,6 %, mais plus proche de 11 %, soit plus d'une espèce d'oiseau sur dix.

En revenant à notre rythme actuel (une extinction d'oiseau tous les deux ans), cette avance d'un millier de victimes prise au « démarrage » nous permettrait d'atteindre le seuil de 50 % d'espèces exterminées (grande extinction en masse des oiseaux) en 8 800 ans, plutôt qu'en 10 000 ans.

C'est encore loin, répéteront les optimistes.

Tout repose en fait sur un dernier facteur déterminant, et non le moindre : les oiseaux vont-ils continuer à disparaître au rythme d'une espèce tous les deux ans (ce qui, rappelons-le, est déjà cinquante fois supérieur au taux d'extinction naturel) ? Allons-nous pouvoir freiner la tendance ou allons-nous au contraire l'aggraver ?

C'est tout l'enjeu auquel sont confrontées notre génération et les générations à venir, comme nous le verrons dans le prochain chapitre, et la grande extinction en masse peut s'avérer beaucoup plus proche que ce que ces premières estimations laissent entendre.

L'extinction des mammifères

Après les oiseaux, honneur aux mammifères, un groupe d'autant plus important que nous en faisons partie. Nombre de leurs espèces sont présentes dans nos vies, que ce soit les animaux d'élevage ou ceux de compagnie, et même les mammifères sauvages déclenchent chez nous de la tendresse ou de l'empathie, car nous reconnaissons chez eux des caractères communs, comme les liens sociaux et les soins apportés aux jeunes.

Pour établir notre statistique du nombre d'extinctions, on pourrait penser que tous les mammifères vivants sont répertoriés depuis longtemps, et pourtant on continue à en découvrir de nouvelles espèces à un rythme surprenant : alors qu'en 1900 on en dénombrait 3 000, on en est aujourd'hui à 5 570 espèces, soit pratiquement le double en l'espace d'un siècle. Les découvertes continuent au rythme d'une trentaine d'espèces par an (359 nouveaux inscrits durant la seule décennie 2000-2009), pratiquement autant que chez les oiseaux. La moitié d'entre elles sont des espèces jamais décrites auparavant, l'autre moitié des sous-espèces qui se trouvent promues au rang d'espèces à part entière.

La plupart des mammifères nouvellement décrits ne sont pas, on s'en doute, des licornes ou yétis totalement distincts des espèces déjà connues, mais de nouveaux membres de familles déjà bien établies – celles des rongeurs et des chauves-souris par exemple – et qui clament une originalité liée par exemple à un habitat spécifique, habitat qui les a vus se différencier de leurs congénères, tout en rendant leur découverte difficile.

Mais il n'y a pas que des rongeurs et des chauves-souris parmi les nouveaux venus. En 2010 fut décrite une nouvelle espèce d'antilope, le céphalophe de Walter (*Philantomba walteri*), chassée en Afrique de l'Ouest pour sa viande et ses cornes et qui s'est donc raréfiée au point d'avoir longtemps échappé aux spécialistes. En 2011 est sorti du chapeau un étonnant petit singe à face aplatie, nez retroussé et longue queue, qui habite les montagnes boisées à la frontière de la Chine et de la Birmanie : ce qui a trahi ce rhinopithèque (*Rhynopithecus strykeri*), c'est qu'avec ses fosses nasales exposées, il éternue quand il pleut.

En 2012, c'est en République démocratique du Congo que l'on a découvert un nouveau singe, cette fois un cercopithèque (*Cercopithecus lomamiensis*), au long nez étroit et au regard timide. Enfin, en 2013, c'est dans les forêts andines d'Amérique du Sud qu'un mammifère arboricole, l'olinguito (*Bassaricyon neblina*), a volé la vedette avec sa mignonne frimousse à mi-chemin entre celle d'un chat et d'un nounours.

www.frenchpdf.com



L'olinguito est une nouvelle espèce de mammifère omnivore, découverte en 2013 en Amérique du Sud. De la famille des Procyonidés – avec pour cousins le raton laveur et le coati – l'olinguito vit dans les forêts andines : il pourrait d'ores et déjà être menacé d'extinction par la destruction de son fragile habitat. (© Juan Rendon/ SavingSpecies.org.)

On continue donc à recenser une trentaine de nouvelles espèces de mammifères par an. En regard de cette liste croissante d'animaux existants, reportons maintenant celle des espèces décédées. Ces extinctions se limitent pour l'instant aux espèces décrites par les naturalistes et les zoologistes depuis l'an 1500 et que l'on ne retrouve plus aujourd'hui, bien que l'on risque de trouver à l'avenir des squelettes de mammifères qui se sont éteints durant la même période sans même avoir été décrits, à l'instar des oiseaux.

Deux remarques s'imposent avant de se pencher sur le bilan. La première, c'est qu'un nombre important de grands animaux ont déjà été exterminés par l'expansion de la population humaine en des temps préhistoriques : l'extinction de la mégafaune à la fin de la dernière période glaciaire, que nous avons couverte au chapitre précédent et que l'on a détachée temporellement des extinctions actuelles. Ce sera aux paléontologues du futur (qu'ils soient terrestres ou extraterrestres !) de décider avec le recul du temps s'ils veulent décrire notre grande extinction en deux vagues séparées ou tout mettre dans le même panier. Rappelons que plus d'une centaine d'espèces de grands mammifères furent occises lors de cette première vague.

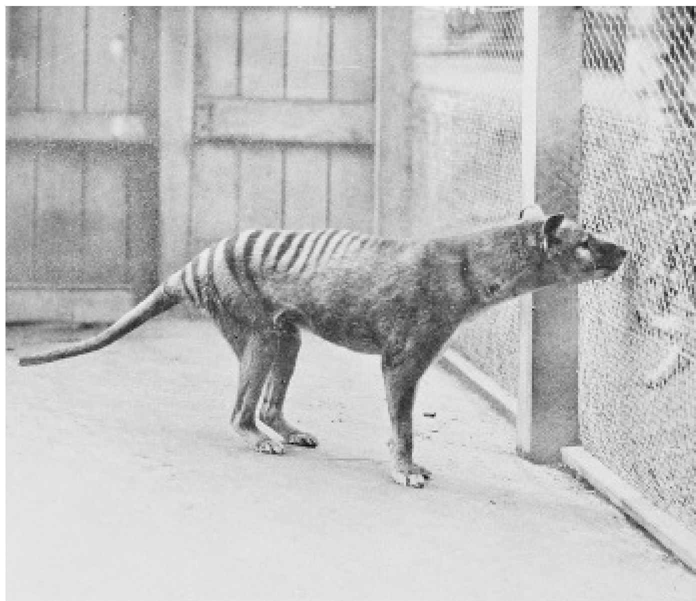
La seconde remarque, c'est que les îles du Pacifique ont été peu colonisées par les mammifères (hormis par quelques espèces de chauves-souris), alors que les oiseaux s'y sont beaucoup implantés et diversifiés. Le débarquement sur ces îles des Polynésiens, puis des Européens, n'a donc pas fait bondir le nombre d'extinctions de mammifères, comme il l'a fait pour les oiseaux.

On compte toutefois plus de 100 espèces de mammifères exterminées durant les temps historiques, dont la moitié durant le seul XX e siècle, soit parce que leur recensement s'est amélioré, soit parce que la funeste tendance s'est véritablement accélérée au siècle passé. Sur un total de 5 570 mammifères, cette centaine de victimes représente un taux d'extinction de 1,8 %, comparable donc à celui des oiseaux[9].

Pour ce qui est de la distribution géographique des massacres, l'Australie a été particulièrement touchée en raison de la vulnérabilité de ses mammifères, tant en raison de la chasse que de l'agression des carnivores – chiens, chats et rats – débarqués avec l'homme, sans compter la déforestation et l'agriculture intensive. Une trentaine de ses espèces endémiques ont ainsi disparu au cours des temps historiques, soit plus de 10 % des mammifères australiens.

Les marsupiaux sont particulièrement affectés, avec notamment l'extinction d'une demi-douzaine d'espèces de kangourous et autres wallabys au XX e siècle. Mais c'est surtout le thylacine (*Thylacinus cynocephalus*), dit aussi loup ou tigre de Tasmanie, qui marque les esprits.

www.frenchpdf.com



Le thylacine ou tigre de Tasmanie fut décimé par les chasseurs, alors qu'il ne présentait aucune menace pour la population et le bétail. Le dernier individu, capturé en 1933, fut enfermé dans le zoo de Hobart et mourut par négligence trois ans plus tard. (© National Archives of Australia, A1200, L35618.)

Ce carnivore original ressemblait à un mélange de ses homologues placentaires des autres continents, avec une tête évoquant à la fois celle d'un renard, d'un loup et d'un félin, et un long corps au pelage tigré. Le thylacine habitait les bois clairsemés d'Australie, Tasmanie et Nouvelle-Guinée, rôdant la nuit à la recherche d'oiseaux et de petits marsupiaux. Pour son plus grand malheur, il occupait le même terrain que celui convoité par les éleveurs et les agriculteurs, et la rumeur se mit à circuler qu'il s'attaquait aux volailles et aux moutons, ce qui est loin d'être prouvé. Qu'à cela ne tienne : sa tête fut mise à prix.

Chasseurs et trappeurs n'eurent pas trop de mal à exterminer l'animal, d'autant qu'il n'était pas bâti pour la course. D'après les primes d'abattage perçues, il en fut massacré plus de deux milliers entre 1888 et 1909. Le temps que les instances de protection de la nature s'inquiètent, il était trop tard : une réserve pour le désormais rarissime thylacine fut recommandée en 1928, mais on ne trouvait déjà plus le principal intéressé.

Un dernier individu fut capturé en 1933 et enfermé au zoo de Hobart en Tasmanie, pour décéder trois ans plus tard par négligence : on avait oublié de lui ouvrir son abri pour la nuit et l'animal mourut de froid, sinon de désespoir, le 7 septembre 1936. Comme le pigeon migrateur aux États-Unis, le loup de Tasmanie est devenu le symbole des extinctions, puisque le 7 septembre est désormais en Australie la journée nationale des espèces menacées.

Le recensement des mammifères disparus peut être ambigu, car il est coutumier de ne déclarer une espèce éteinte que cinquante ans après le dernier signalement d'un individu, le temps de s'assurer qu'il ne reste pas un survivant quelque part : ainsi, si le dernier thylacine est mort en 1936, l'espèce ne fut déclarée éteinte qu'en 1986.

Cette prudence « administrative » était tout à fait louable autrefois, mais aujourd'hui les choses vont bien trop vite pour que l'on puisse patienter à ce point, et les zoologistes sont plus réactifs. Lorsqu'une espèce importante semble s'évanouir dans la nature, des expéditions sont montées pour tenter de trouver les derniers individus, sinon de les sauver. Ce fut le cas pour le dauphin de Chine ou baiji (*Lipotes vexillifer*) qui mérite une mention particulière, car c'est le premier gros mammifère à disparaître de la surface du globe depuis le phoque des Caraïbes dans les années 1950.

Déesse du fleuve Yangzi, le dauphin baiji – à peine plus grand qu'un homme et au long museau en spatule – se comptait par milliers dans les années 1950, jusqu'à être pris en grippe par Mao Tsé-toung lui-même et sa révolution économique du « Grand Bond en avant ». Autrefois auréolé d'une vénération mystique, le cétacé n'avait plus sa place dans un monde où seul le parti était sacré et les anciennes croyances se devaient d'être éradiquées.

Le pauvre baiji n'avait pas besoin que l'on encourage sa chasse, lui qui était déjà mis à mal par les filets des pêcheurs et le trafic des navires. En 1970, il n'en restait plus que quelques centaines, et si sa chasse fut enfin interdite en 1983, la construction du barrage de Gezhouba, puis de celui des Trois-Gorges, acheva de lui pourrir la vie. En 1997, le nombre des dauphins était tombé à treize très exactement, recensés lors d'une première expédition consacrée à leur recherche. Un seul baiji fut signalé en 2004, ce qui motiva une nouvelle expédition internationale pour constater une situation devenue critique.

www.frenchpdf.com

Au cours de cette ultime croisière conduite sur six semaines en 2006, et malgré 3 500 kilomètres de navigation, pas un seul baiji ne fut aperçu. Et même si un individu ou deux ont pu échapper à la détection, cela ne suffit pas à perpétuer l'espèce : au terme de l'expédition, le baiji a donc été déclaré officiellement éteint. L'ironie du sort, c'est que les instances chinoises avaient commencé à établir une réserve dans un lac voisin pour stocker et protéger les derniers dauphins.

Mais comme pour le loup de Tasmanie, il était trop tard.

Amphibiens et reptiles

Les amphibiens ont été les premiers vertébrés à conquérir la terre ferme, il y a 370 millions d'années, puis les reptiles et les premiers protomammifères en furent issus quelques dizaines de millions d'années plus tard, au terme d'améliorations tant dans leur ossature et leur mode de locomotion que dans leur stratégie de reproduction.

On a tendance à penser, du haut de notre arrogance d'espèce dominante, qu'amphibiens et reptiles sont aujourd'hui sur des voies de garage de l'évolution – on en traite même certains de « fossiles vivants » – alors que seuls les mammifères, et à la rigueur les oiseaux, respireraient le progrès.

Malgré leurs traits archaïques, amphibiens et reptiles sont pourtant des exemples de réussite, et si leur aspect a peu changé au cours des âges géologiques, c'est que justement il n'y a pas grand-chose à améliorer : ce sont des animaux très bien adaptés à leur environnement.

Commençons par les reptiles. Vous serez surpris d'apprendre qu'au fil d'un recensement de plus en plus poussé (200 nouvelles espèces répertoriées chaque année depuis 2010), les reptiles ont dépassé en août 2014 la barre des 10 000 espèces[10]. Sur le podium des vertébrés, derrière les intouchables poissons, les reptiles sont ainsi en passe de détrôner les oiseaux de la seconde place, alors que les mammifères ne viennent que loin derrière en quatrième position.

Dans le détail, il existe sur Terre plus de 6 000 espèces de lézards, geckos, iguanes et varans ; plus de 3 500 espèces de serpents ; 341 espèces de tortues ; et 25 espèces de crocodiles, alligators et gavials.

Sur ce total, pour ce qui est des extinctions, la classe des reptiles semble pour l'instant mieux se porter que celles des oiseaux et des mammifères, puisque les recensements ne font état que d'une trentaine de victimes dans les temps historiques, soit un taux d'extinction de 0,3 % seulement.

On a déjà cité le gecko géant de Nouvelle-Zélande : le *kawekaweau*. Comme lui, la quasi-totalité des disparus sont des espèces insulaires, massacrées par les chats, chiens et autres mangoustes débarqués par les colons. Ainsi furent exterminés un lézard de Martinique au XIX e siècle, l'améive de Guadeloupe (dont les dernières colonies en bordure du littoral furent ravagées par le passage d'un cyclone en 1928), ou encore le boa fouisseur de l'île Ronde, au large de l'île Maurice, vu pour la dernière fois en 1975.

Aux 13 espèces de lézards et 5 espèces de serpents exterminées, il faut ajouter 11 espèces de tortues, chassées pour leur viande et leur carapace, et ce malgré les tentatives de protection. La dernière victime en date semble être l'une des tortues géantes des îles Galápagos (espèce ou sous-espèce *Chelonoidis abingdonii*) dont le dernier représentant est décédé sur l'île de Pinta le 24 juin 2012. On aurait toutefois repéré deux ou trois survivants éventuels sur le flanc d'un volcan de l'île voisine d'Isabela la même année, ce qui entretient l'espoir que l'animal puisse encore être sauvé.

Toujours est-il qu'avec leur taux d'extinction de seulement 0,3 %, les reptiles s'en sortent plutôt bien pour l'instant. Est-ce une illusion ? Nous verrons au chapitre suivant quelles sont les perspectives pour le groupe. Pour les amphibiens, en revanche, la situation est nettement plus préoccupante au regard des tendances actuelles.

À l'instar des reptiles, les amphibiens ont tardé à voir leur grande diversité reconnue : eux aussi ont vu leur recensement exploser au cours des deux dernières décennies. De 2000 à 2009 notamment, 1 194 nouvelles espèces ont été cataloguées, soit près de 20 % de leur nombre total, estimé aujourd'hui à près de 7 500[11]. Les grenouilles viennent largement en tête (90 % des espèces nouvellement découvertes), loin devant les salamandres. Citons pour l'anecdote la découverte en 2013 du plus petit vertébré au monde : une grenouille de Nouvelle-Guinée longue de 7 millimètres (*Paedophryne amauensis*) qui tient facilement sur une pièce d'un centime d'euro.

Chez les amphibiens, cette hausse des espèces nouvellement recensées masque pour l'instant le nombre de celles qui s'éteignent, puisque le bilan des extinctions historiques (depuis l'an 1500) s'établit en 2014 à seulement 38 espèces. En nombre absolu, c'est similaire au bilan des reptiles, mais comme le total des espèces est un peu moindre chez les amphibiens, le rapport est légèrement supérieur : 0,5 % d'extinctions environ. Pas de quoi fouetter une grenouille, si ce n'était pour trois constats inquiétants.

Le premier, c'est que le taux d'extinction est en hausse. Sur les 38 pertes enregistrées en cinq siècles, une douzaine (soit le tiers) l'a été depuis 1980, au cours des trois dernières décennies. Cela tient en partie à la découverte de

www.frenchpdf.com

nouvelles espèces dans des milieux reculés et fragiles, qui sont souvent dans une situation déjà critique : à peine répertoriées, elles s'éteignent devant les chercheurs impuissants.

Ainsi en fut-il de l'extraordinaire grenouille plate d'Australie orientale (genre *Rheobatrachus*), découverte en 1972, dont la femelle avale et incube ses œufs dans son estomac, interrompant son alimentation et la sécrétion de sucs gastriques pour la circonstance, jusqu'à ce que ses têtards se métamorphosent en petites grenouilles qui lui ressortent par la bouche. Animal remarquable, sauf que justement on ne le remarque plus depuis 1981. Un champignon parasite, introduit par les activités humaines, aurait eu raison des deux uniques espèces du genre : après vingt-cinq années de recherches infructueuses dans leurs ruisseaux favoris, force est de reconnaître qu'elles se sont éteintes.

Le second constat, c'est que la hausse récente des extinctions des amphibiens ne reste modeste que par manque de moyens pour lancer des expéditions à la recherche de toutes les espèces dont on craint la disparition. Environ 120 espèces d'amphibiens attendent ainsi confirmation de leur décès, ce qui fera grimper – une fois ce décès constaté – le pourcentage d'extinction du groupe de 0,5 % à 2 %.

Le troisième constat, qui vaut aussi pour les autres groupes comme on l'a vu pour les oiseaux, c'est qu'échappent au recensement les espèces décédées au cours des temps historiques, qui n'ont jamais été observées : le fameux « facteur fantôme ». Si certaines l'ont été *in extremis*, comme la « momie » de cette grenouille du Sri Lanka découverte dans un tiroir du Muséum d'histoire naturelle de Londres, un nombre inconnu d'amphibiens a dû disparaître dans la nature sans laisser de traces, la probabilité que l'on retrouve leurs fragiles squelettes étant bien moindre que de trouver une espèce vivante qui sautille et coasse.

Malgré leur bilan d'extinction modeste pour l'instant, les amphibiens sont donc beaucoup plus menacés qu'on ne le pense : on verra au chapitre suivant qu'ils sont sans doute même le groupe animal le plus menacé de la planète.

Bilan des insectes : des durs à cuire ?

Nous avons logiquement fait passer en priorité les vertébrés terrestres dans notre recensement, car ce sont les animaux les plus familiers et dont la disparition nous inquiète le plus.

Or ce sont évidemment les insectes qui remportent la palme de la biodiversité sur Terre, leur recensement ayant dépassé en ce début du troisième millénaire la barre du *million* d'espèces : 1 023 430 en 2009, avec 10 000 nouvelles espèces décrites chaque année.

Chez celles nouvellement recensées, les coléoptères – scarabées, hannetons et autre coccinelles – arrivent en tête, suivis par les hyménoptères (abeilles, guêpes et fourmis), les diptères (mouches et moustiques), et enfin les lépidoptères (papillons et mites). On citera ainsi comme exemples de découvertes récentes la petite guêpe espagnole *Kollasmosoma sentur* qui vole à ras du sol et injecte ses œufs dans les fourmis qu'elle rencontre sur son chemin ; ou encore le mille-pattes jaune de Tanzanie (*Crurifarcimen vagans*) dont le nom latin signifie « saucisse à pattes vagabonde » et qui a effectivement l'aspect d'une chipolata un peu périmée.

À ce grouillement d'invertébrés il faut ajouter 100 000 arachnides (araignées, acariens et scorpions) qui constituent une classe à part et s'enrichissent de 1 500 nouvelles espèces par an. On citera ainsi la belle tarentule du Brésil (*Pterinopelna sazimai*), d'un bleu iridescent, qui habite le sommet des hauts plateaux au-dessus de la forêt vierge. Enfin, parmi les petits invertébrés, citons 63 000 espèces de vers aussi… divers que variés.

On comprend aisément qu'avec des milliers de nouvelles espèces à cataloguer par an, les entomologistes n'ont guère le temps de se soucier des extinctions. Est-ce pour cette raison que la liste des espèces disparues est étonnamment réduite ? Ou bien est-ce parce que les insectes, arachnides et autre vers sont particulièrement résistants aux bouleversements en cours de l'écosystème ?

Ce ne serait pas la première fois qu'ils échappent aux catastrophes, puisque lors des grandes extinctions passées du monde animal, les insectes ont été peu touchés : on arrive à peine à établir que des extinctions plus grandes qu'à l'ordinaire sont survenues lors de la crise de la fin du Crétacé. Seule la crise de la fin du Permien, il y a 250 millions d'années, semble affecter les insectes : certaines estimations portent à 60 % le nombre d'espèces éradiquées à l'époque, mais ces nombres restent controversés. Pour expliquer cette résilience des insectes, on évoque notamment leur faculté d'hibernation lors de périodes climatiques défavorables.

Toujours est-il qu'à l'heure actuelle, le taux de disparition des insectes et des arachnides ne se distingue pas du « bruit de fond » naturel : environ 70 espèces éteintes historiquement dans le dernier bilan publié en 2011, sur un total d'un million d'espèces, cela ne représente en effet qu'un pourcentage d'extinction de 0,007 % en un demi-millénaire.

Lorsque l'on se penche sur la liste des victimes, toutefois, une grande partie sont déclarées aux États-Unis : sept insectes défunts pour les seules îles Hawaï, et trois en Californie. Cela confirme l'impression que le recensement des espèces éteintes dépend de l'attention qu'on veut bien leur accorder, et qu'au fin fond de l'Amazonie ou des forêts

www.frenchpdf.com

d'Indonésie, il y a moins de spécialistes et d'associations de défense des insectes qui s'inquiètent de leur sort qu'à Honolulu et San Francisco.

Sur le peu de cas répertoriés, trois exemples valent la peine d'être cités, l'un parce qu'il illustre qu'un grand nombre d'individus ne protège pas nécessairement l'espèce d'une disparition, les deux autres pour montrer les interactions et interdépendances complexes au sein d'un écosystème.

En termes d'effondrement d'une population, l'extinction du criquet des montagnes Rocheuses (*Melanoplus spretus*) est aussi stupéfiante que celle du pigeon migrateur chez les oiseaux. Au XIX e siècle, des nuées spectaculaires de ces insectes s'abattaient tous les cinq ou six ans sur les Grandes Plaines à l'est des Rocheuses, du Canada au Texas, dévorant tout sur leur passage, « sauf nos dettes » ironisaient les agriculteurs écœurés. Ainsi, un sombre jour de juillet 1874, une nuée de criquets éclipsa le Soleil sur une surface grande comme la France. On estime sa population à plusieurs *milliers de milliards* d'insectes qui tombaient du ciel pour s'amasser en un tapis, épais par endroits d'un bon pied, avec un crépitement semblable à celui d'un feu de forêt : leur masse totale devait représenter 25 millions de tonnes, la charge de cent pétroliers géants. Dans le *Guinness Book* des records, il s'agit de la plus grande concentration d'animaux jamais observée. Leurs cultures dévastées, plus de cent mille agriculteurs qui tentaient de coloniser les Grandes Plaines furent acculés à la famine et durent être secourus par l'armée.

Moins de trente ans plus tard, en 1902, le dernier criquet des Rocheuses était aperçu et capturé au sud du Manitoba. Plus un seul individu n'a été rapporté depuis. En 2014, on a finalement déclaré l'espèce éteinte.

Comment donc une espèce, qui avait battu tous les records d'affluence, a-t-elle pu complètement disparaître en un laps de temps si court ? Là aussi, comme pour le pigeon migrateur, la réponse tient à la reproduction. Nombreux en été, les criquets chutaient à un nombre réduit de survivants en automne, rejoignant leurs lieux de reproduction : un petit nombre de vallées au pied des Rocheuses, à la frontière du Montana et du Wyoming. Les femelles y pondaient leurs œufs dans le sol – un sol qui changea soudain d'usage lorsque ces mêmes fermiers qui souffraient des criquets décidèrent d'y faire pâturer leurs bêtes et d'y planter de la luzerne.

Sans le savoir, ils ravagèrent le sanctuaire des larves. La luzerne consommée par les insectes eut des effets délétères sur leur cycle de croissance, tout comme le piétinement des bêtes contribua à les décimer. On dit aussi qu'en parallèle la chasse au castor démantela les barrages naturels sur les cours d'eau, inondant leurs plaines alluviales et noyant les larves. Voilà comment une espèce prolifique peut être exterminée, si on s'attaque au maillon faible de son cycle de vie.

Les deux autres exemples sont moins spectaculaires, mais illustrent d'autres aspects du fonctionnement d'un écosystème. Un petit papillon bleu (*Glaucopsyche xerces*), qui vivait dans les dunes de sable près de San Francisco, entretenait une relation fort sympathique – en tout cas symbiotique – avec une fourmi locale. Sa chenille secrétait un succulent miellat pour la fourmi, laquelle en échange la protégeait des insectes parasites. Chacun y trouvait son compte. Mais la vague d'urbanisation qui a rayonné autour de San Francisco s'est accompagnée d'une invasion de fourmis ordinaires qui ont évincé les fourmis des dunes. Les nouvelles venues étaient apparemment peu intéressées par un partenariat avec les chenilles. Ayant perdu leurs alliées, celles-ci ont donc dépéri, et avec elles le joli papillon bleu, vu pour la dernière fois en 1943.

La mite du châtaignier américain (*Ectodemia castaneae*) a disparu pour sa part à la suite du déclin de son hôte végétal, le châtaignier en question. Lui-même avait été frappé au début du XX e siècle par un champignon parasite d'Asie – le chancre du châtaignier – que l'homme a certainement colporté dans ses bagages. Le châtaignier américain a périclité, entraînant dans sa chute le papillon de nuit, et si l'arbre s'est redressé par la suite, l'insecte ne s'en est jamais remis.

Au royaume des plantes

Plantes et insectes, on le sait, sont étroitement dépendants. Le butinage des fleurs par les abeilles et les papillons, en particulier, est essentiel à la reproduction végétale. Que les insectes ne se soient pas encore effondrés en une extinction en masse explique donc, en partie, pourquoi la biodiversité des plantes est elle aussi préservée.

Les plantes arrivent en seconde position derrière les insectes au regard du nombre d'espèces : au rythme des nouvelles découvertes – environ 2 000 par an – la barre des 300 000 espèces est aujourd'hui dépassée[12]. On en découvre de tous les genres et de toutes les tailles, de la minuscule violette du Pérou (*Viola lilliputana*), qui s'élève moins d'un centimètre au-dessus du sol, à l'arbre du dragon (*Dracaena kaweesakii*) haut d'une douzaine de mètres, aux centaines de branches enroulées dans tous les sens, aux feuilles effilées en forme de sabre et aux fleurs couleur crème dont émergent de belles étamines orangées. L'arbre du dragon pousse sur les hautes buttes calcaires au-dessus des forêts thaïlandaises, mais on le trouve aussi dans la cour de nombreux temples bouddhistes et même chez les particuliers, car il porte chance. Pourtant l'espèce n'a été cataloguée qu'en 2014 : comme quoi, même une espèce peu discrète peut échapper à la sagacité des chercheurs.

On comprend mieux, en revanche, pourquoi *Bulbophyllum nocturnum* a tardé à rejoindre la liste (en 2011) : cette

www.frenchpdf.com

orchidée ne fleurit que la nuit au fond des forêts de Nouvelle-Guinée, et un seul plant a été observé pour l'instant ! Ses jours sont d'ailleurs en danger, car la déforestation progresse à grands coups de tronçonneuse dans ce secteur de l'île.

À ce jour, toutefois, la liste des extinctions chez les plantes est loin d'être alarmante. Selon les sources, on tourne autour de 100 à 150 disparitions recensées au cours des temps historiques. Il est vrai, et la remarque s'applique à l'ensemble de la biosphère, qu'il est plus facile et gratifiant de découvrir une nouvelle espèce que de constater une extinction.

Dans le premier cas, il suffit de tomber par hasard, ou au fil d'une campagne, sur un spécimen nouveau. Dans le second, il faut ratisser tout l'habitat d'une espèce menacée, et souvent à plusieurs reprises et à plusieurs années d'intervalle, jusqu'à être sûr qu'il ne reste aucun individu de l'espèce en question. La tâche est particulièrement ingrate, car il n'y a aucune récompense en cas de « succès » – plutôt un pincement au cœur – alors qu'en découvrant une nouvelle espèce, on peut avoir son patronyme immortalisé dans le nom de l'espèce. En outre, en affirmant une extinction, on peut être contredit : quelqu'un peut découvrir un beau jour un individu rescapé d'une espèce déclarée éteinte, ce qui est heureux pour l'espèce, mais vexant pour celle ou celui qui aura publié le faire-part du décès et se sera fait moucher.

Cela dit, que peut-on tirer comme enseignements de cette liste provisoire de plantes déclarées éteintes ? Comme pour les insectes, au lieu de représenter un échantillonnage équilibré de la situation mondiale, elle reflète plutôt les travaux ponctuels, au hasard de l'histoire et des opportunités, effectués dans des régions particulières du globe.

Le sursis des poissons

La vie terrestre est née dans les océans et quand on pense biodiversité, on a tendance à placer en tête les espèces marines. Insectes et arachnides de la terre ferme, plantes et champignons les distancent pourtant, et ce n'est qu'en cinquième position que l'on trouve les mollusques – et encore, c'est un groupe partagé entre terre et mer – et en sixième position les crustacés, avec respectivement 86 500 et 48 700 espèces recensées. Viennent ensuite les chromistes (algues brunes et phytoplanctons) et seulement en huitième position les poissons avec 33 200 espèces cataloguées en octobre 2015.

Avec ces derniers, toutefois, le monde aquatique redresse quelque peu l'échine (si l'on peut dire), puisque les poissons occupent tout de même la première place des vertébrés, comme on l'a déjà signalé, loin devant les amphibiens, reptiles, oiseaux et mammifères.

Le recensement est loin d'être terminé, puisque l'on découvre de nouveaux animaux marins et d'eau douce au rythme de 700 espèces de crustacés, 500 espèces de mollusques et 300 espèces de poissons chaque année, sans compter une centaine de nouveaux coraux et méduses (les cnidaires, qui totalisent 10 000 espèces), une cinquantaine d'éponges (6 000 espèces au total) et une trentaine d'étoiles de mer et d'oursins (les échinodermes, 7 000 espèces).

En somme, le monde aquatique cumule donc approximativement 250 000 espèces, toutes classes confondues, avec un taux de croissance global de 2 000 nouvelles espèces (près de 1 %) chaque année.

Parmi les récentes découvertes, citons une anémone vivant sous la banquise de l'Antarctique (*Edwardsiella andrillae*) – le corps incrusté dans la glace et les tentacules s'agitant juste en dessous –, une éponge en forme de candélabre ou de lyre (*Chondroclaria lyra*) vivant par 3 400 mètres de fond au large des côtes californiennes, ou encore le « *pancake batfish* » du golfe du Mexique (*Halieutichtys intermedius*), poisson au corps aplati en galette boursouflée, qui se déplace sur le fond en se traînant sur ses nageoires pectorales, comme une chauve-souris qui se dandine au sol.

On est loin d'avoir terminé le recensement marin qui demande beaucoup plus de moyens que sur la terre ferme et implique de coûteuses et laborieuses campagnes avec des navires océanographiques, voire des bathyscaphes. De l'avis des spécialistes, le nombre d'espèces marines qui restent à découvrir frise sans doute le million, ce qui ne risque pas toutefois de menacer la supériorité numérique des espèces terrestres, les entomologistes faisant valoir qu'ils ont aussi de la réserve, et que leur million d'insectes répertoriés pourrait facilement doubler ou tripler au cours des décennies à venir.

En passant des découvertes aux extinctions, le bilan est quant à lui étonnamment modeste, surtout si l'on considère les poissons. On pourrait penser qu'avec la surpêche, la pollution et le changement climatique, la disparition de leurs espèces devrait être inquiétante, ou en tout cas notable.

Il n'en est rien, du moins pour l'instant. Depuis les temps modernes (à partir de l'an 1500), seules 65 espèces de poissons ont officiellement disparu, selon la dernière liste publiée en 2015[13]. Cela représente une perte de diversité de 0,002 % seulement.

Quand on se penche sur la liste des disparus, la surprise est encore plus grande : un seul poisson éteint est marin.

www.frenchpdf.com

Il s'agit d'une petite demoiselle des îles Galápagos, *Azurina eupalama*, et encore : il pourrait en survivre quelques bancs autour de petites îles au large du Pérou.

La quasi-totalité des victimes sont donc des espèces d'eau douce, et il y a une raison pour cela. Dans l'océan, vu la mobilité des poissons, tout changement défavorable du milieu, que ce soit la température, la pollution ou la surpêche, peut être surmonté par la migration des espèces vers des zones refuges, même si le nombre des individus peut décroître dans l'aventure. L'extinction n'est donc pas inéluctable. Il faut donc bien séparer les deux phénomènes : l'effondrement d'une population de poissons et son extinction. Apparemment, l'effet de seuil joue beaucoup moins dans les océans que sur la terre ferme où une stratégie de reproduction mise à mal peut soudain mener du déclin à l'extinction, comme on l'a vu pour le pigeon migrateur et le criquet des Rocheuses.

En revanche, les habitats d'eau douce sont souvent limités en taille, voire fermés. Un stress porté sur ce type d'environnement, qu'il soit climatique ou bien dû à l'introduction d'une espèce concurrente, peut être fatal.

Parmi les poissons dont on a constaté l'extinction, certains habitaient de petites mares isolées qui dépendaient des pluies pour subsister : l'assèchement des mares a logiquement entraîné la disparition de leurs poissons, comme ce fut le cas du bien nommé *Cyprinodon inmemoriam* et autres « *pupfish* » (poissons chiots) de l'Arizona – petits poissons des sables qui doivent leur sobriquet à la parade nuptiale des mâles, semblables aux charges et chamailleries de jeunes chiots en train de jouer.

De plus larges habitats ont aussi été touchés, comme celui du *Gila crassicauda* des vallées centrales de Californie. Ce genre de petite carpe était l'un des poissons les plus abondants de la région. Prisé des Amérindiens, il alimenta par la suite les étals de San Francisco, mais la diversion des eaux pour irriguer l'agriculture mit à mal son environnement, au point qu'il disparut en l'espace de quelques décennies : le dernier spécimen fut pêché dans les années 1950, et on ne le trouve plus qu'en bocal dans les musées.

La disparition des poissons par concurrence d'espèces invasives, introduites par l'homme, est une autre source de préoccupation. On connaît l'exemple de la perche du Nil (*Lates niloticus*), ce gros carnivore originaire d'Éthiopie qui a été relâché dans de nombreux lacs d'Afrique pour alimenter l'industrie de la pêche, tellement l'espèce est rentable : ce sont de véritables monstres qui peuvent atteindre 200 kilogrammes et font vivre 200 000 pêcheurs, voire deux millions de personnes en comptant toute la filière de production. Le grand problème, c'est qu'ils dévorent tous les poissons locaux des lacs où ils ont été introduits, à commencer par le lac Victoria : les centaines d'espèces de cichlidés ont vu leurs populations s'effondrer, mais sans encore que l'on enregistre d'extinctions. Cela ne saurait tarder.

Dans de plus petits habitats, l'introduction d'espèces étrangères s'est déjà traduite par l'extinction d'espèces locales. C'est le cas de la truite argentée du New Hampshire, remplacée par la truite de lac, des orestias du lac Titicaca, également évincés par une truite, ou de la truite de l'Atlas marocain remplacée par une carpe.

En Europe, ce sont plutôt la surpêche et la pollution qui viennent à bout des espèces, une famille de salmonidés – les corégones ou bondelles – ayant été particulièrement touchée. L'espèce acclimatée à la Meuse et au Rhin a disparu dans les années 1940. Mais c'est surtout la féra des lacs alpins – lac Léman en tête – qui laisse des regrets : prisé des restaurateurs pour sa chair délicate, le poisson a été surpêché avec de grands filets dérivant. Le stock s'est effondré au cours de la première moitié du XX[e] siècle : le dernier individu fut capturé en 1958 et l'espèce est aujourd'hui déclarée éteinte[14].

S'il s'agit pour l'instant d'anecdotes, et si aucun poisson populaire et cosmopolite n'a disparu des étals, la tendance pour le groupe risque de changer au cours de notre siècle, comme nous le verrons au chapitre suivant.

Coquillages et crustacés

Les crustacés totalisent près de 50 000 espèces – recensement en cours – et comptent encore moins d'espèces frappées d'extinctions que les poissons, puisque la liste officielle de l'UICN (l'Union internationale de conservation de la nature) n'en signale qu'une dizaine. À nouveau, toutes sont des espèces d'eau douce, le monde marin connaissant là aussi un sursis.

Une crevette d'eau douce a disparu de Floride, et deux écrevisses naines ont disparu de leurs petites mares mexicaines, mares asséchées par pompage excessif de la nappe phréatique. La Californie se distingue quant à elle par la disparition d'une crevette d'eau douce des ruisseaux autour de Los Angeles – destruction de l'habitat, suite à l'urbanisation – et par celle d'une écrevisse près de San Francisco : l'écrevisse cendrée (*Pacifastacus nigrescens*). Celle-ci fut acculée à l'extinction par une espèce invasive introduite pour le plaisir des pêcheurs : l'écrevisse du Pacifique, dite aussi écrevisse de Californie.

L'écrevisse de Californie est d'ailleurs l'une des trois espèces d'écrevisses américaines introduites en France qui déciment notre population d'écrevisses européennes. Si ces dernières ne se sont pas encore éteintes, elles n'en mènent pas large face à l'invasion yankee : le danger vient en fait de l'agent pathogène que transportent les écrevisses américaines, à savoir un champignon parasite responsable de la « peste de l'écrevisse ». Toute espèce

www.frenchpdf.com

sous stress, et notamment les espèces européennes, est particulièrement vulnérable au fléau.

Cela étant, s'il faudra bientôt remplacer sur nos menus les écrevisses sauce Nantua par des écrevisses à l'américaine, notre plateau de fruits de mer ne paraît pas menacé pour sa part : homards, langoustes, crabes et araignées ne s'éteignent pas sur les étals, et il en est de même pour les coquillages.

Les mollusques – que ce soit les bivalves à l'image des palourdes, ou les gastéropodes à l'image des escargots – représentent 100 000 à 200 000 espèces, et on ne peut pas dire qu'ils aient défrayé la chronique chez les recenseurs de la biodiversité terrestre et marine. Si l'on se penche sur la liste des espèces officiellement disparues dans les temps historiques – 29 bivalves et 281 gastéropodes dans le recensement 2015 de l'UICN – on s'aperçoit qu'il s'agit surtout de variétés locales dans des endroits particulièrement bien étudiés, comme les îles Hawaï ou la côte atlantique des États-Unis, et qu'il s'agit essentiellement d'espèces non marines : moules d'eau douce et escargots terrestres en particulier. En France, on notera la disparition de la parmacelle de la Crau, un cousin de la limace, près de la ville d'Arles – on peut désormais l'appeler l'Arlésienne – et celle d'un escargot d'eau douce dans les faubourgs de Toulouse, qui n'a pas été aperçu depuis cinquante ans.

Notons aussi la mésaventure d'une espèce d'escargot de l'archipel des Seychelles, l'escargot bagué d'Aldabra à la superbe coquille indigo cerclée de bandes orange, qui était l'escargot le plus répandu de son atoll, mais qui est en passe de succomber à l'effet de serre, à la suite d'étés très chauds et du manque de pluie. Disparu en 1997, il a été revu en août 2014, comme quoi il ne faut pas enterrer une espèce trop vite, surtout s'il s'agit d'un escargot.

Dans le monde marin, les mollusques ne montrent pas encore de signes de faiblesse, puisque trois espèces seulement sont déclarées historiquement éteintes : deux chapeaux chinois (patelles), dont l'un était très courant sur la côte atlantique des États-Unis et a succombé à l'effondrement des herbiers qui l'abritaient, et une espèce de bigorneau. C'est bien anecdotique par rapport aux 100 000 mollusques actuellement recensés, les 300 espèces perdues ne représentant que 0,3 % du total. On est loin des 75 % d'espèces de mollusques exterminées lors de la crise de la fin du Crétacé et des 95 % d'espèces présumées disparues lors de la crise de la fin du Permien. Le proche avenir est toutefois préoccupant, au regard du réchauffement climatique, et bivalves, gastéropodes et crustacés pourraient soudainement voir leur sursis expirer.

1.

Le bilan s'applique aux Grandes Antilles (Cuba, Hispaniola et Porto Rico). Dans les Petites Antilles il y eut parfois des rescapés, notamment une espèce de paresseux sur une petite île au large de Panama.

2.

Cette hypothèse repose sur l'existence d'un hypothétique cratère d'impact de 20 kilomètres de diamètre sur le fond marin au large de la Nouvelle-Zélande, et sur un dépôt sableux de type tsunami présent sur l'île, mais l'origine cosmique du premier et l'âge historique du second ont été invalidés par les experts.

3.

L'avidité des collectionneurs ne s'arrête pas après l'extinction d'une espèce, bien au contraire. Lors d'une vente aux enchères à Auckland en juin 2010, une plume de huia s'est vendue pour 8 000 dollars néo-zélandais (5 600 €), le plus haut prix payé jusqu'à présent pour une plume d'oiseau.

4.

Différent du pigeon voyageur qui est un pigeon biset commun (*Columba livia*), le pigeon migrateur se distingue par sa petite tête, son poitrail rouge-orangé et ses longues ailes effilées.

5.

P. Ehrlich, D. S. Dobkin et D. Wheye, *The Birder's Handbook : A Field Guide to the Natural History of North American Birds*, Touchstone, 1988.

6.

Une sous-espèce est un groupe isolé d'individus d'une espèce, qui commence à manifester des caractéristiques spécifiques qui le distinguent du reste de l'espèce, mais dont les membres continuent à pouvoir se reproduire avec ceux en dehors du groupe.

7.

Selon l'IOC (International Ornithologist Congress), le total serait de 10 612 espèces aviaires en octobre 2015.

8.

www.frenchpdf.com

Autrefois, les extinctions d'espèces étaient peu ou prou compensées par l'apparition de nouvelles espèces lors de divergences au sein d'une lignée, et le total demeurait stable. Opposé au rythme des extinctions actuelles, celui des « créations » est en revanche négligeable et ne compense pas les pertes.

9.

Le paradoxe est que l'on découvre de nouvelles espèces de mammifères plus vite qu'on ne les extermine, ce qui fait qu'au cours des prochaines années, le pourcentage des extinctions par rapport au total des espèces recensées va temporairement diminuer plutôt qu'augmenter.

10.

10 272 espèces recensées en août 2015, série en cours, d'après www.reptile-database.org.

11.

7 489 espèces d'amphibiens sont recensées par amphibiaweb.org (chiffres de décembre 2015).

12.

Selon A. D. Chapman (2009), le nombre global d'espèces de plantes dépasserait 307 000, mais en comptant les espèces encore à découvrir, le nombre réel serait plus proche de 400 000.

13.

Les nombres cités pour les extinctions proviennent du dernier recensement global de l'Union internationale de conservation de la nature (UICN), publié en 2015.

14.

Suite à sa disparition, la vraie féra (*Coregonus fera*) a été remplacée par un cousin, le corégone blanc ou « palée » (*Coregonus albula*), qui perpétue le nom de « féra » auprès des pêcheurs et restaurateurs.

www.frenchpdf.com

6

Espèces menacées : une situation critique

Si l'on s'en tient uniquement à la liste des espèces officiellement disparues au cours des temps historiques, on pourrait faire preuve d'optimisme et dire, comme Candide, que tout est pour le mieux dans le meilleur des mondes possibles. Avec des pourcentages d'extinction qui tournent autour de 2 % chez les mammifères et les oiseaux, moins d'un pour cent chez les reptiles et les amphibiens, et bien moins encore chez les insectes, plantes, poissons, coquillages et crustacés, où est-elle donc, cette grande extinction du monde vivant qui nous pendrait au nez ?

Les grandes extinctions en masse des temps géologiques, comme celle qui décima la biosphère à la fin du Crétacé, il y a 66 millions d'années, ou pire encore celle de la fin du Permien, il y a 252 millions d'années, ont exterminé 75 % et 95 % respectivement de toutes les espèces vivantes de leur époque. On en est loin aujourd'hui. Mais l'est-on vraiment ?

Ce serait le cas si les nombres actuels restaient figés en l'état. Mais il s'agit d'une dynamique, d'un déclin qui se poursuit et – là est la vraie menace – qui aurait tendance à s'accélérer dans les années à venir. De l'avis de nombreux spécialistes, ce que nous avons comptabilisé jusqu'à présent n'est qu'une amorce de la crise, et le compteur risque bientôt de s'affoler.

Conjectures que tout cela ? Exagérations des alarmistes qui n'ont pour motivation que de récolter des fonds pour nourrir les programmes de recherche ?

Certains pourraient se conforter dans cette idée, s'il n'y avait des méthodes scientifiques, fondées sur des critères vérifiables et précis, qui permettent d'analyser objectivement la situation.

Un travail de fourmi a en effet été abattu par les muséums d'histoire naturelle et les ONG depuis la Seconde Guerre mondiale, travail qu'est venue fédérer l'UICN : l'Union internationale pour la conservation de la nature (IUCN en anglais). Fondée en octobre 1948 à Fontainebleau sous l'égide de l'Unesco, cette ONG internationale œuvre pour la défense des espèces, a soutenu la création d'une organisation parallèle tournée vers le public – la WWF ou World Wide Fund for Nature – et publie à intervalles réguliers une liste rouge des espèces menacées.

Une première ébauche de liste, édifiée en 1949, ne compte que 14 espèces de mammifères et 13 espèces d'oiseaux en difficulté. En 1964, la première liste officielle y ajoute un mammifère supplémentaire, triple le nombre des oiseaux, et introduit deux amphibiens, trois reptiles et six poissons. Cinquante ans plus tard, à l'heure de l'informatique et d'internet, et avec le soutien d'un nombre croissant de chercheurs à travers le monde, la liste rouge des espèces menacées a explosé : celles-ci se comptent désormais en dizaines de milliers.

Avant d'en prendre connaissance, il convient de définir les critères qui permettent d'avancer qu'une espèce est menacée d'extinction. Il y en a deux principaux, que l'on peut estimer indépendamment, bien qu'ils soient étroitement liés : le déclin des populations et la fragmentation de leur habitat.

La chute des populations : l'exemple de l'éléphant

C'est une évidence : pour qu'une espèce s'éteigne, il faut d'abord que sa population diminue.

Or cette tendance préalable est aujourd'hui constatée pour la grande majorité des espèces vivantes. Nous en sommes tous témoins : qui n'a pas constaté au cours de sa vie, c'est-à-dire en l'espace de quelques décennies seulement, la baisse, voire la disparition locale d'animaux familiers, que ce soit des papillons, des oiseaux, des grenouilles ou même des poissons ?

Il faut bien sûr être prudent dans ces constats : nombreuses sont les espèces dont les populations fluctuent naturellement, voire migrent géographiquement en fonction des conditions climatiques, sans que la tendance globale ne soit à la baisse. À l'inverse, il faut aussi se méfier du repeuplement par l'homme, à des fins récréatives de chasse ou de pêche, d'espèces particulières qui se retrouvent en quelque sorte en « respiration artificielle », mais dont les populations naturelles ont par ailleurs chuté.

Cela étant dit, la situation est réellement préoccupante, si l'on en croit les estimations de Rodolfo Dirzo, biologiste à l'université de Stanford en Californie, et de ses coauteurs du Royaume-Uni, du Mexique et du Brésil, résumées dans un article daté de 2014. Selon les chercheurs, si l'on prend en compte l'ensemble des vertébrés terrestres –

www.frenchpdf.com

mammifères et oiseaux, reptiles et amphibiens –, les populations ont chuté en moyenne de 25 % depuis 1975. Un quart des populations mondiales de vertébrés passé à la trappe en quarante ans, cela fait réfléchir. Et comme il s'agit d'une moyenne, nombre de cas particuliers sont encore plus préoccupants.

Il suffit de citer comme exemple le cas tragique des éléphants d'Afrique, classés en deux espèces : l'éléphant de savane (*Loxodonta africana*) qui représente les trois quarts des individus, et l'éléphant de forêt (*Loxodonta cyclotis*). On estime qu'au début de l'ère moderne (l'an 1500 par définition et 1800 dans la pratique, lorsque les Européens sont venus chasser et au passage recenser les bêtes), le continent africain aurait compté 26 millions d'éléphants. Au début du XX e siècle, on peut chiffrer leur population aux alentours de 10 millions d'individus. Puis la situation se gâte pour de bon avec l'explosion du marché de l'ivoire à destination des empires coloniaux. Lorsque les États africains acquièrent leur indépendance à partir des années 1950, la situation ne s'améliore pas, bien au contraire, et on tombe sous la barre du million d'éléphants au début des années 1980. En 1989, il n'en reste plus que 600 000.

C'est alors qu'un espoir renaît. Des mesures efficaces sont prises, comme l'embargo sur l'ivoire décrété par les États-Unis, son plus grand consommateur jusqu'alors. La population des éléphants au Kenya se met même à croître et, bon an, mal an, le nombre des animaux se stabilise durant deux décennies autour de 600 000 à travers le continent africain.

L'espoir est hélas brisé par l'ouverture d'un nouveau marché de contrebande vers la Chine. La reprise du massacre est violente, avec 25 000 éléphants de savane abattus par des braconniers en 2011 ; 22 000 en 2012, à la grenade et à la kalachnikov ; et tout autant en 2013. Cette année-là, la population rescapée est estimée à 472 000 individus, et un grand projet de recensement par hélicoptère est en cours en 2016.

En attendant les derniers chiffres, la population de l'éléphant de savane d'Afrique a déjà chuté de 95 % depuis 1913 et au rythme actuel, si des mesures draconiennes ne sont pas prises, la population tendra vers zéro en 2025. La situation de l'éléphant de forêt est identique : il en reste encore moins aujourd'hui (on parle de 100 000 individus) et il est encore plus difficile de les compter ou de surprendre les braconniers derrière le rideau végétal. Des nombres alarmant circulent quant à leur extermination – 15 000 par an –, de sorte que cette espèce aussi est menacée d'extinction à l'horizon 2025.

Voilà donc un exemple de chute de population menant éventuellement à une extinction à court terme. On peut espérer que la guerre contre les braconniers sera gagnée et la descente aux enfers des éléphants enrayée, mais d'ores et déjà la chute sévère de leur population a des effets redoutables : affaiblissement du rôle écologique des éléphants (voir encadré) et grande fragilité des espèces qui, de par leur population étriquée, sont désormais vulnérables à toute autre menace qui pourrait s'ajouter à celle des chasseurs.

Les espèces « clefs de voûte »

Certains animaux jouent un rôle important dans l'écosystème en contribuant au bien-être de nombreuses autres espèces dans leur entourage. On les appelle espèces « clefs de voûte » (*keystone species* en anglais). C'est notamment le cas des abeilles qui assurent la pollinisation de nombreuses plantes. C'est aussi le cas de gros animaux comme l'éléphant et l'hippopotame qui façonnent fortement leur environnement.

À l'instar de la mégafaune de l'âge glaciaire qui a piétiné en son temps les arbustes et créé à leur place une steppe de hautes herbes, l'éléphant de savane entretient un paysage ouvert qui fait prospérer d'autres herbivores comme les gazelles. On constate l'importance de cette fonction lorsque l'éléphant vient à disparaître, comme ce fut le cas au Natal en Afrique du Sud au début du XX e siècle. Depuis, la savane a été envahie par arbres et buissons, entraînant la disparition locale des gazelles et des gnous.

Quant à l'éléphant de forêt, il joue un rôle différent en entretenant au contraire celle-ci : grand mangeur de fruits, il en dissémine les graines sur de longues distances dans son crottin, favorisant ainsi la repousse des arbres. Mais en ouvrant des passages à travers la forêt, il divise aussi suffisamment celle-ci pour créer des pare-feu qui arrêtent la propagation des incendies.

L'hippopotame assure des fonctions tout aussi importantes dans le milieu aquatique en traçant des sillons au fond des mares, permettant la circulation d'autres espèces, et sur les berges où ces fossés canalisent les eaux de pluie et tempèrent les inondations. En déféquant dans les eaux, ce gros herbivore contribue aussi à bâtir un riche écosystème de micro-organismes qui nourrit quantité de poissons, lesquels profitent en retour aux oiseaux et même aux pêcheurs locaux.

Une espèce « clef de voûte » revêt ainsi une telle importance que lorsque ses effectifs diminuent en deçà d'un certain seuil où ses bienfaits ne se font plus sentir dans l'écosystème, on dit alors que l'animal subit une *extinction écologique*, même s'il est encore présent.

Insectes et poissons : début de l'hécatombe

Si on a une bonne idée des stocks déclinants de vertébrés, la situation est plus difficile à cerner pour les insectes et

www.frenchpdf.com

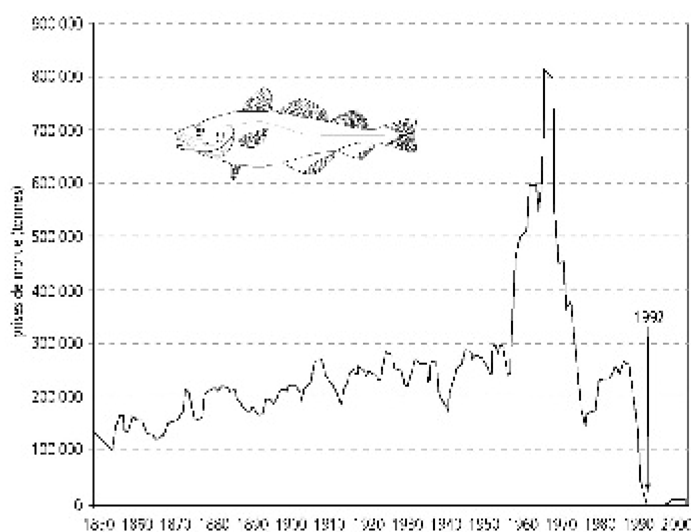
autres invertébrés, vu le nombre considérable d'espèces à analyser. Les estimations menées sur 452 d'entre elles, qui constituent un échantillonnage plus ou moins représentatif du groupe, font état d'une baisse moyenne des populations de l'ordre de 45 % en quarante ans. Autrement dit, sur cette courte période, le nombre d'insectes a chuté de près de moitié, ce qui a d'ailleurs surpris les spécialistes.

« Nous avons été choqués de constater de telles baisses chez les invertébrés, baisses qui sont comparables à celles des vertébrés », s'est d'ailleurs inquiété Ben Collen de l'University College de Londres, coauteur de l'étude, « car on avait tendance à croire que les invertébrés étaient plus résilients[1]. »

La situation est d'autant plus inquiétante que nombre d'insectes sont indispensables à la bonne santé de l'écosystème, notamment pour la pollinisation des fleurs. Là aussi, il n'est pas nécessaire que leurs espèces s'éteignent pour qu'une situation de crise soit atteinte : il suffit que leurs populations atteignent un seuil critique, en deçà duquel il leur est impossible de convenablement remplir leur rôle dans la biosphère, pour que celle-ci dans son ensemble soit gravement touchée. C'est le concept de *l'extinction écologique* (voir encadré).

Enfin, le monde marin est lui aussi particulièrement marqué par les chutes de population. Nombreux sont les écologistes qui y voient le prélude à une grande vague d'extinctions marines, l'océan ayant longtemps échappé aux massacres à grande échelle que l'homme a perpétués sur les continents, car leur mise en œuvre demandait des moyens plus sophistiqués en haute mer. Hormis la chasse à la baleine, il a fallu ainsi attendre le XXe siècle pour que les espèces marines soient traquées à l'échelle industrielle. Aujourd'hui, le retard est en passe d'être rattrapé et les populations de poissons s'effondrent, comme le montre l'exemple emblématique de la morue.

Véritable gisement de protéines et de vitamines pour le monde occidental, la morue ou cabillaud (*Gadus morhua*) a une grande aire de répartition des deux côtés de l'Atlantique Nord, mais l'essentiel de la population séjourne au large du Canada et notamment sur les hauts-fonds ou « bancs » de Terre-Neuve. On sait combien la France, notamment, a pratiqué la pêche à la morue jusqu'au début du XXe siècle, en longues campagnes transatlantiques à partir des ports normands et bretons. L'industrialisation de la pêche, avec l'introduction de la senne – filet traînant sur le fond –, a accompagné l'explosion du marché de la morue dans les années 1950, les captures frisant le million de tonnes par an à la fin des années 1960.



Déclin de la morue

Avec l'essor de la pêche industrielle à partir des années 1950, le tonnage de morues pêchées a explosé, pour s'effondrer brutalement à cause de la surpêche dès les années 1970, puis 1990, les stocks ayant atteint un niveau alarmant (d'après Vital Water Graphics, UNEP, 2008, données du Millenium Ecosystems Assessment).

Puis les prises commencent à sérieusement chuter. Les pêcheurs côtiers sont les premiers à s'en inquiéter et sonnent l'alarme. En 1992, le Canada décide de geler la pêche à la morue au large de Terre-Neuve, moratoire qu'il étend l'année suivante à toutes ses côtes, le temps que les stocks se reconstituent. Après une réouverture contrôlée de la pêche en 1999, et des quotas de 20 000 à 30 000 tonnes par an, force est de constater que la biomasse s'est effondrée et ne se renouvelle pas. La fermeture de la pêche à la morue est de nouveau décrétée en 2003.

On estime en effet que les stocks actuels de morues dans leur habitat principal (partie sud du golfe du Saint-Laurent, Terre-Neuve comprise) ont chuté à moins de 30 000 tonnes en 2014, soit 15 millions d'individus si l'on assigne un poids moyen de 2 kilogrammes à chaque poisson. Or les estimations font valoir qu'au début des années 1960, il y avait près de *trois milliards* d'individus. Le calcul est simple : en un demi-siècle, la population de la morue

www.frenchpdf.com

a été divisée par 200 : il ne reste plus que 0,5 % du stock de l'époque.

La morue se remettra-t-elle de ce carnage, maintenant que la pêche a été stoppée dans les eaux territoriales du Canada ? Ce n'est même pas sûr. Diminuée comme elle l'est, la morue bat de l'aile, ou devrait-on dire de la nageoire. Depuis le moratoire sur sa pêche, sa population ne semble pas vouloir se redresser. Ironie du sort, on attribue cette stagnation au fait que leurs proies, notamment les harengs, ont vu leur nombre rebondir et qu'ils s'attaquent… aux œufs de morue. Comme quoi l'équilibre d'un écosystème est bien délicat.

Destruction de l'habitat : l'exemple du tigre

Si chez une espèce la chute de la population représente une menace évidente d'extinction, la détérioration de son habitat, à commencer par sa réduction, est également un facteur critique.

On connaît l'histoire de *La Peau de chagrin*, célèbre roman de Balzac : une peau magique exauce tous les désirs de son propriétaire, lui apportant gloire et fortune, mais diminue de surface à chacun de ses vœux. Finalement le héros se rend compte qu'il n'en restera rien s'il continue à désirer, mais il est trop tard : frappé par la maladie, il n'ose plus s'en servir et sa survie devient sa seule préoccupation.

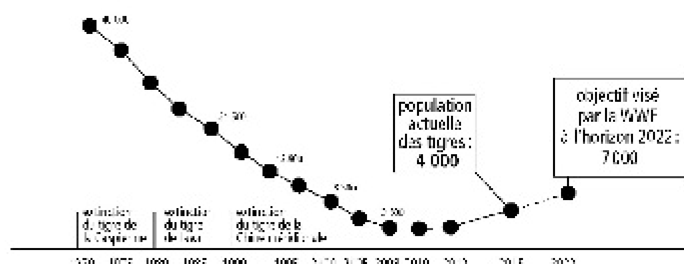
On peut dresser un parallèle avec la réduction des surfaces naturelles, suite aux désirs des hommes d'améliorer leur sort et d'amasser des richesses (exploitation de minerais ou conversion de forêts en terres agricoles). Mais c'est réduire du même coup la diversité animale et végétale avec, *in fine*, la menace que la civilisation n'ait aucune marge de manœuvre pour redresser la situation, condamnée comme le héros de Balzac à tenter seulement de survivre.

L'homme ne se sent pas menacé pour l'instant – qui continue à satisfaire ses désirs d'expansion – mais ce sont les autres espèces qui voient leur habitat décliner.

L'habitat d'une espèce, c'est d'un point de vue global son aire de répartition géographique (appelée zone d'occurrence), ou au sein de celle-ci les poches où on la trouve effectivement (appelées zones d'occupation). La réduction de l'habitat peut s'effectuer de deux façons : par contraction globale d'une zone, rognée à sa périphérie par l'empiétement de l'agriculture ou de l'urbanisme ; ou bien par sa fragmentation en plusieurs morceaux, éclatant la population animale concernée en sous-populations séparées par des barrières infranchissables, qu'elles soient urbaines, agricoles ou autres (autoroute ou canal, par exemple). Prisonnières de leurs sous-habitats exigus, les sous-populations peuvent alors manquer d'espace vital – notamment si leur mode d'alimentation ou de reproduction nécessite de longs déplacements – alors que, pour autant, la surface totale occupée par l'espèce n'a pas nécessairement décru de façon drastique.

Souvent, la détérioration de l'habitat joue sur les deux tableaux : réduction de la surface globale qu'habite l'espèce *et* son éclatement en petites poches disjointes d'occupation.

C'est cette double menace qui pèse actuellement sur le tigre. Déjà persécuté par les braconniers, à la fois pour sa fourrure et pour ses os qui sont prisés en Asie dans les médecines traditionnelles, ce félin de la famille de la panthère (*Panthera tigris*) voit son territoire reculer devant l'expansion de la civilisation humaine, sur tous les fronts où il s'était implanté. Avant même l'essor de l'homme, il s'était en effet acclimaté à plusieurs régions, au point que les biologistes reconnaissent neuf sous-espèces. Deux se sont déjà éteintes dans des régions coupées du continent : le tigre de Bali, signalé pour la dernière fois en 1939, et le tigre de Java, disparu en 1979. Victime également de la chasse et de la contraction de son habitat naturel, le tigre de la Caspienne, qui circulait du Caucase à l'Afghanistan, n'a plus été vu pour sa part depuis 1968. On n'a plus vu non plus le tigre de Chine méridionale depuis un quart de siècle : même si quelques individus survivent cachés quelque part, il est lui aussi considéré comme éteint.



Déclin du tigre

Le déclin du tigre s'accompagne de l'extinction de sous-espèces dans des régions sinistrées : le tigre du Bengale représente à lui seul 75 % de la population restante de l'espèce et sa protection pourrait pratiquement doubler cette population d'ici 2022 (d'après Rodolfo Carlos Pazos/TODAYonline).

www.frenchpdf.com

Restent cinq sous-espèces qui sont toutes menacées d'extinction : le tigre de Malaisie, dont on estime la population restante à 300 individus en 2014 ; le tigre de Sumatra, qui ne se porte guère mieux, avec 400 individus ; le tigre d'Indochine, qui occupait une aire couvrant le Cambodge et le Laos, la Birmanie, la Thaïlande et le Vietnam, et dont les forêts ont été tellement morcelées qu'il n'en reste plus, là aussi, que 350 individus ; et le tigre de Sibérie, ou de l'Amour (le fleuve, pas ses exploits amoureux !), le plus gros type de tigre, dont la population s'est stabilisée à 540 individus en 2015. La Russie développe d'ailleurs des efforts d'ingéniosité pour freiner la destruction de son habitat, notamment en établissant des corridors écologiques pour relier les poches de survie.



Tigre de Sibérie (ou de l'Amour) en captivité, au parc Howletts de la vie sauvage dans le Kent. (© Wikimedia Kevin Law CC BY-SA 2.0.)

Quant à la dernière sous-espèce, c'est encore la plus répandue : le tigre du Bengale, qui occupe l'Inde, le Bangladesh, le Népal et le Bhoutan, représente à lui seul 70 % de la population mondiale des tigres. Mais lui aussi est en situation inquiétante, car il n'en demeure que 2 500 individus en 2015 – un recensement précis établi grâce à un réseau de 10 000 caméras automatiques installées dans tous les recoins de la jungle. Il y a néanmoins quelques signes d'espoir concernant cette sous-espèce qui avait chuté à 1 400 individus en 2006 et qui a donc repris du poil de la bête en l'espace d'une décennie, grâce notamment à une trentaine de réserves en Inde qui protègent l'animal.

Toutes sous-espèces confondues, il ne reste toutefois que 4 000 tigres sur Terre, contre une population estimée à 100 000 bêtes en 1990 : la diminution a donc été de 96 % en l'espace de vingt-cinq ans. Dans le même intervalle de temps, la surface de leur habitat a diminué de moitié : si on exclut les pertes dues au braconnage, cela veut dire que la relation entre perte de surface et perte de population n'est pas linéaire, mais exponentielle. Des seuils critiques sont franchis en deçà desquels la population s'effondre.

En ce qui concerne le tigre, il apparaît que son talon d'Achille est le nombre de proies nécessaires à son alimentation – une cinquantaine de sangliers ou de cerfs par an, soit un animal par semaine –, ce qui implique une surface de prospection conséquente[2], d'autant que le nombre de proies est lui aussi enclin à diminuer. Quittant son aire naturelle de chasse pour satisfaire ses besoins, il s'approche trop des villages où il peut alors être abattu.

D'après ce constat, il est peu probable que la population du tigre rebondisse, l'espoir étant seulement de stabiliser son déclin aux chiffres actuels, d'autant que cette minipopulation est désormais vulnérable à tout autre stress qui pourrait précipiter sa chute.

La forêt amazonienne

Comme autre exemple de destruction d'habitat s'impose évidemment le cas critique de la forêt amazonienne.

C'est la plus grande forêt du monde : elle s'étend sur plus de 5 millions de kilomètres carrés, soit dix fois la taille de la France, dont les deux tiers au Brésil. La diversité des espèces animales et végétales y est proprement exubérante, puisqu'on estime qu'une espèce de la planète sur dix, au bas mot, occupe cette forêt équatoriale. Dans le détail on y trouve 427 espèces de mammifères (dont un tiers est endémique), y compris une multitude de singes, tapirs et tatous, ocelots et jaguars, rongeurs et chauves-souris, sans oublier deux espèces de dauphins d'eau douce, un lamantin et une loutre géante qui sillonnent l'Amazone. On y dénombre 1 300 espèces d'oiseaux, plusieurs centaines d'amphibiens et de reptiles, et 2 200 espèces de poissons d'eau douce. Environ 40 000 espèces de plantes y ont été décrites, dont 16 000 espèces d'arbres. Quant aux invertébrés, insectes en tête, les chercheurs en ont dénombré plus de 100 000 espèces.

Autrefois impénétrable et de ce fait protégée, la forêt amazonienne a amorcé son déclin avec l'ouverture d'axes

www.frenchpdf.com

routiers, à commencer par l'autoroute Belem-Brasilia en 1958, le long desquels les colons se sont installés, abattant les arbres pour leur bois ou faisant place nette par le feu, soit pour élever du bétail, soit pour planter du soja, soit pour s'enrichir facilement en revendant le terrain dénudé – au prix de vente cinq à dix fois supérieur à la même surface boisée. La multiplication de routes transversales, souvent illégales, et la falsification de titres de propriété ont accéléré le phénomène, de sorte que la déforestation a rapidement dépassé 10 000 kilomètres carrés par an – l'équivalent d'un grand département français – pour atteindre 20 000 kilomètres carrés par an au tournant du siècle et culminer à 27 000 kilomètres carrés en 2004, la superficie de la Bretagne.



Malgré des efforts pour l'enrayer au début du siècle, la déforestation de la forêt amazonienne continue au rythme de 5 000 km^2 par an : la surface d'un département français. (© Rhett A. Butler/Mongabay.com.)

À ce rythme, la forêt amazonienne aurait perdu la moitié de sa surface (un poumon sur deux, pourrait-on dire) avant la fin du siècle en cours, si les pouvoirs publics n'avaient pas réagi, notamment au Brésil, et renversé la tendance : le taux de déforestation a considérablement chuté au cours des dix dernières années, repassant sous la barre des 5 000 kilomètres carrés en 2012. À ce coup de frein s'est ajouté une hausse concomitante de la surface mise sous tutelle, les zones naturelles protégées ayant doublé en dix ans pour friser aujourd'hui 2 millions de kilomètres carrés.

Reste à faire respecter la loi et cela passe par une prise de conscience de la valeur économique de la forêt amazonienne, comme on le verra dans le dernier chapitre. Il faudra aussi que le réchauffement climatique n'achève pas le massacre, ce que l'on évoquera également.

Entre-temps, il faut panser les plaies et faire l'inventaire de ce que l'on a déjà perdu en termes de biodiversité. Mais si le pourcentage de déforestation est connu – un total de 760 000 kilomètres carrés depuis les années 1970 (soit environ 15 % de la forêt) – le pourcentage des espèces exterminées l'est en revanche beaucoup moins. Déterminer qu'une espèce a disparu signifie en effet l'avoir d'abord observée vivante. Or, au rythme où la forêt a été détruite, le risque est grand que de nombreuses espèces soient passées de vie à trépas sans jamais avoir été cataloguées. Et pour celles qui l'ont été, s'ajoute aussi un temps de réaction dans l'évaluation de leur statut : pour une espèce soupçonnée d'extinction, il faut revenir constater son absence plusieurs années de suite, avant de pouvoir officiellement la déclarer disparue.

Enfin, il y a les effets à retardement : la réduction d'un habitat passe d'abord, pour les espèces vulnérables, par une chute de leur population et non pas une extinction instantanée. Alors qu'elles sont de fait condamnées, elles ne rejoindront la liste des extinctions « actées » que plusieurs années, voire plusieurs décennies plus tard. C'est ce que les spécialistes appellent la « dette » d'extinctions que nous contractons, et qu'il serait plus précis de qualifier de « pertes projetées ».

Alors, peut-on avancer des chiffres pour la forêt amazonienne ? Au-delà d'une liste d'espèces particulières, qui tarde à venir en raison des difficultés citées plus haut, ce sont des estimations théoriques que l'on avance. Les modèles qui tentent de mettre en équation réduction de l'habitat et réduction de la biodiversité assignent une perte de 0,2 à 0,3 % des espèces amazoniennes pour chaque pour-cent de forêt détruite3. Pour l'instant, donc, avec 15 % de forêt dévastée, il est à craindre que 3 % à 5 % des espèces amazoniennes soient déjà condamnées, soit 1 200 à 2 000 des 40 000 plantes recensées ; 40 à 65 des 1 300 espèces d'oiseaux répertoriées, et ainsi de suite. Quant aux insectes, s'ils totalisent plus de 100 000 espèces en Amazonie, on devrait constater l'extinction de 3 000 à 5 000 d'entre elles dans les années à venir.

La liste rouge des espèces menacées

www.frenchpdf.com

Sur la foi des exemples précédents, comme celui de la forêt amazonienne, on voit que la tâche qui attend les zoologistes et les botanistes est immense. Dresser la liste de toutes les espèces vivantes de la planète est déjà un défi ; dresser celle des espèces déjà éteintes ou condamnées n'est pas plus facile, comme on vient de le voir. Néanmoins, ce n'est pas le plus urgent : le véritable enjeu est désormais de suivre toutes les espèces vivantes en difficulté, afin, au mieux, d'agir pour les empêcher de rejoindre la liste des disparus, ou au pire de constater la dynamique des disparitions en direct pour faire des projections réalistes et alerter l'opinion.

C'est cette lourde responsabilité qui incombe aujourd'hui à l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN) dont on a déjà cité les travaux.

éteint	EX	mammouth moa
éteint à l'état sauvage	EW	cheval de Przewalski râle de Guam
en danger critique	CR	gorille des montagnes rhinocéros noir
en danger	EN	baleine bleue tortue franche
vulnérable	VU	éléphant d'Afrique ours blanc
quasi menacé	NT	thon jaune jaguar
préoccupation mineure	LC	grand dauphin loup gris

Catégories UICN

L'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN) classe les espèces animales et végétales en fonction des menaces qui pèsent sur elles, et suit l'évolution de leur statut. On considère comme « espèces menacées » l'ensemble des groupes CR, EN et VU.

En France, l'UICN fédère une douzaine d'organismes publics, dont les ministères concernés, et une quarantaine d'ONG au rang desquelles on citera par exemple la Fédération des conservatoires botaniques nationaux (FCBN), la Ligue pour la protection des oiseaux (LPO) ou encore l'Office national de l'eau et des milieux aquatiques (ONEMA). Responsable de cet inventaire global sur le territoire, le Muséum national d'histoire naturelle (MNHN) tient à jour cette base de données française qui est intégrée à l'inventaire mondial.

Consultable en ligne[4], cet inventaire mondial est mis à jour plusieurs fois par an. Tout d'abord, c'est la liste des espèces répertoriées et suivies qui s'allonge. Elle ne concerne qu'une fraction du nombre d'espèces cataloguées sur Terre (lequel, rappelons-le, est de l'ordre de 2 millions), car il s'agit de suivre les populations et leurs conditions d'existence, ce qui n'est pas possible pour toutes. Mais le travail abattu a été considérable : en 2015, les spécialistes de l'UICN suivaient 79 837 espèces d'animaux et de plantes à travers le monde, avec pour objectif ambitieux de doubler la mise et de suivre 160 000 espèces en 2020.

On comprendra que certains groupes d'animaux et de plantes sont plus ciblés que d'autres, car il faut bien faire des choix. En raison de l'intérêt qu'on leur porte, tous les mammifères et tous les oiseaux sont suivis ; et parce que leurs groupes sont très menacés, tous les amphibiens sont en passe de l'être également (86 % en 2015), ainsi que toutes les plantes gymnospermes (conifères et cycadales). Les reptiles sont moins couverts (45 %), tout comme les poissons (25 %, ce qui représente tout de même 13 250 espèces surveillées). En bas de liste, seuls trois milliers de crustacés et cinq milliers d'insectes sont sous surveillance pour l'instant (7 % et 0,5 % respectivement du nombre total recensé), deux listes qui connaîtront certainement un allongement considérable à l'avenir.

Le suivi est donc, pour l'instant, partiel et subjectif. L'échantillon ne peut même pas être considéré comme représentatif de l'ensemble de la biosphère (sauf en ce qui concerne les groupes totalement surveillés), puisqu'on a tendance à surveiller d'abord les espèces que l'on pressent menacées, ce qui biaise les statistiques. Tout au plus peut-on dire qu'en étoffant la liste au fil du temps, on tend vers un portrait de plus en plus juste de l'état du monde animal et végétal.

Cela étant, quelles sont les différentes catégories de menace dans lesquelles on classe les espèces surveillées, et quelles sont les règles suivies pour l'élaboration de ce classement ?

www.frenchpdf.com

Tout d'abord, et « hors concours » devrait-on dire cyniquement, il y a la catégorie des espèces déjà éteintes : nous en avons fait le tour au chapitre précédent. C'est d'ailleurs une catégorie double : on distingue en effet les espèces « totalement » éteintes (label EX pour l'anglais *extinct*) et les espèces éteintes à l'état sauvage (label EW, *extinct in the wild*), mais dont il reste quelques individus dans des zoos ou réserves.

Au sommet des préoccupations vient ensuite la catégorie des espèces « en danger critique » (label CR : *critically endangered*) qui regroupe les espèces présentant *un risque extrêmement élevé d'extinction à l'état sauvage*. C'est en quelque sorte le couloir des condamnés à mort : si rien n'est fait pour les sauver, il est quasi certain qu'elles passeront à brève échéance dans la catégorie des espèces éteintes. En déployant des efforts, nous pouvons ralentir ou suspendre leur déchéance, et avec réussite les faire descendre d'un cran dans la catégorie inférieure, celle des espèces simplement « en danger » (EN : *endangered*) où le qualitatif change de risque *extrêmement élevé* d'extinction à celui de risque *très élevé* d'extinction à l'état sauvage.

En continuant de descendre l'échelle des préoccupations, vient ensuite la catégorie des espèces « vulnérables » (label VU : *vulnerable*) où le risque d'extinction est seulement qualifié *d'élevé*.

Ces trois catégories – « en danger critique », « en danger » et « vulnérable » – rassemblent donc, à des niveaux de préoccupation décroissants, toutes les espèces dites *menacées*. Dans certaines statistiques, on les traite d'ailleurs en bloc.

Deux catégories sont situées du bon côté de la barrière : les espèces « quasi menacées » (NT : *near threatened*) qui sont proches du seuil de la catégorie « vulnérable » et qui pourraient y basculer si aucune mesure n'est prise ; et les espèces de « préoccupation mineure » (LC : *least concern*) qui ne sont pas inquiétées pour l'instant. Enfin, il y a les espèces dont les données sont insuffisantes à l'heure actuelle pour les placer dans une catégorie (DD : *data deficient*) ; et celles qui ne sont pas encore suivies (NE : *non evaluated*).

Sans faire durer le suspense plus avant, comment se répartissent dans ces différentes catégories les quelque 80 000 espèces surveillées en 2015 ? Toutes familles confondues, 4 898 espèces sont en danger critique d'extinction (soit environ 6 %) ; 7 323 en danger (9 %) ; et 11 029 vulnérables (13,5 %). En faisant la somme des trois catégories, 23 250 espèces sont donc menacées d'extinction, soit environ 30 % des espèces suivies.

S'il faut être circonspect quant à la représentativité de ces nombres pour les groupes encore insuffisamment échantillonnés, comme les insectes et les plantes, force est de constater qu'ils sont très fiables pour les groupes totalement suivis comme les mammifères, les oiseaux et les plantes gymnospermes (conifères et cycadales), ou quasi totalement suivis comme les amphibiens.

Selon les chiffres de 2015, les mammifères cumulent ainsi 1 200 espèces menacées (en danger critique, en danger et vulnérables), soit 22 % de leurs membres ; et les oiseaux 1 375 espèces menacées, soit 13 % de leurs membres. Le bilan global est alourdi par les amphibiens (30 % d'espèces menacées) et surtout par les plantes (54 %).

Rappelons qu'il s'agit ici de risques d'extinction – extinctions qui ne sont pas encore actées – mais c'est justement là le point important : c'est à nous d'agir, ou de ne pas agir, pour que ces espèces dans le couloir de la mort soit survivent, soit disparaissent.

En danger critique

Près de 5 000 espèces animales et végétales sont donc en danger critique d'extinction. Comment et pourquoi les a-t-on classées dans cette catégorie ? Quels sont les critères objectifs qu'utilisent les chercheurs, suffisamment simples pour qu'on puisse les appliquer à des groupes aussi divers que des mammifères et des crustacés, sans devoir inventer une nouvelle méthodologie à chaque fois ?

On ne s'étonnera pas – c'est pourquoi nous les avons introduits en début de chapitre – que les deux critères clés pour juger de la santé d'une espèce sont la taille de sa population et la taille de son habitat. On fixe un seuil minimal, de l'une comme de l'autre, et une tendance éventuelle à la baisse, comme critères sélectifs.

Les chercheurs ont ainsi défini cinq façons au choix pour une espèce (parlons d'espèce animale pour simplifier) d'être déclarée en danger critique d'extinction. La première et la plus simple, c'est qu'elle possède moins de 50 individus matures, c'est-à-dire capables de se reproduire. À ce stade, il est clair que l'espèce est à deux doigts de s'éteindre. C'est le cas notamment du lépilémur septentrional, un petit lémurien nocturne du nord de Madagascar, dont la population a été estimée en 2015 à une quarantaine d'individus : l'animal figure parmi les primates les plus menacés de la planète.

La seconde option pour figurer sur la liste concerne les espèces dont la population est un peu plus large, mais inférieure à 250 individus matures. Il suffit alors que la population soit sur le déclin, c'est-à-dire qu'elle ait perdu au moins 25 % de ses effectifs au cours des dix dernières années (ou en l'espace de trois générations) pour que la situation soit déclarée critique. C'est le cas par exemple du dauphin maui de Nouvelle-Zélande, dont on ne trouve plus qu'une cinquantaine d'individus et dont la population s'effondre : 80 % de pertes en trois générations.

www.frenchpdf.com

La troisième option ignore la taille absolue de la population – celle-ci peut donc être conséquente – et joue uniquement sur son déclin relatif : est classée en danger critique une espèce qui a perdu 90 % ou plus de sa population en l'espace de dix ans (ou trois générations), voire 80 % s'il est établi en parallèle que les causes de ce déclin n'ont pas cessé.

C'est le cas par exemple du saïga (*Saiga tatarica*), la seule antilope d'Eurasie, reconnaissable à son museau busqué et aux belles cornes annelées du mâle. Autrefois répandu des Carpates à la Mongolie, il a vu sa population chuter d'un million de têtes au milieu des années 1990 à moins de 50 000 en 2003, soit 95 % de pertes en dix ans. Cette antilope est en effet chassée par les braconniers – principalement russes – qui en vendent les cornes aux pays asiatiques où elles sont utilisées en médecine traditionnelle. En outre, nous verrons que le changement climatique n'arrange pas le sort de la bête.



Saïgas dans la réserve naturelle de Stepnoi (Russie). (© Andrey Giljov & Karina Karenina, saigaresourcecenter.com.)

La quatrième option pour figurer sur la liste rouge repose sur la réduction de l'habitat : dans les cas où il est difficile de compter les individus, mesurer la contraction de leur environnement est généralement un bon indicateur de leur statut, par exemple en comparant des images satellite d'une année sur l'autre. Ainsi, une espèce est classée en danger critique si sa zone d'occurrence est tombée sous la barre des 100 kilomètres carrés (approximativement la surface de Paris *intra muros*) et qu'en outre cette zone est fragmentée en petites localités d'occupation des bêtes, dont on constate que le nombre ou la surface diminue.

Enfin, il existe une cinquième option pour qu'une espèce soit classée en danger critique, lorsqu'il est difficile d'appliquer les critères précédents : c'est une sorte de carte blanche accordée aux chercheurs, qui doivent montrer par des analyses fiables qu'une population possède plus d'une chance sur deux de disparaître en l'espace de dix ans.

Lorsque l'on regarde la liste des espèces qui se retrouvent, à l'aune de ces critères, en danger critique d'extinction, deux groupes d'animaux illustrent assez bien la situation actuelle sur Terre : celui des mammifères et celui des amphibiens.

Les mammifères nous intéressent bien sûr en priorité, car il s'agit de notre famille (ou plutôt de notre « classe », pour respecter la terminologie des classifications). Ils sont fort divers et occupent toutes sortes de niches écologiques, ce qui les rend représentatifs de l'ensemble des animaux. Enfin, ils sont tous suivis par l'UICN.

On prendra donc note qu'en 2015, 209 mammifères (soit 4 % des espèces) étaient en danger critique d'extinction. C'est un peu moins que la moyenne de tous les êtres vivants surveillés (6 %), mais c'est tout de même important.

Parmi les mammifères les plus menacés, on relèvera en priorité les primates, à commencer par les lémuriens de Madagascar, à l'image du lépilémur. Leur habitat forestier est détruit pour l'agriculture et la contrebande du bois exotique, et dans un contexte de pauvreté économique, ces petits animaux arboricoles sont même chassés pour leur viande. En tout, 22 des 101 espèces de lémuriens malgaches (donc 22 %) sont en danger critique d'extinction.

Les autres primates ne se portent guère mieux, notamment les singes, tant de l'Ancien Monde que du Nouveau Monde. En Amérique du Sud, une dizaine d'espèces de singes hurleurs (alouates), singes-araignées et singes laineux, et une demi-douzaine de capucins figurent sur la liste critique. En Asie, 18 espèces de singes y figurent de même, parmi lesquelles des langurs, des macaques, des gibbons et un orang-outang. En Afrique enfin, sont menacées trois espèces de guenons, cinq colobes, le kipunji (découvert en 2003), et un gorille.

Sur les quelque 450 espèces de primates recensées, environ 60 sont donc en danger critique d'extinction, ce qui

www.frenchpdf.com

représente une proportion de 17 %.

Parmi les autres familles de mammifères, sont également en situation critique 64 espèces de rongeurs (rats, souris, campagnols, hutias des Caraïbes, chinchillas, plus une marmotte et un écureuil volant) ; 25 espèces de chauves-souris ; plusieurs musaraignes ; 9 félins (dont 5 tigres et panthères, 2 guépards et le lynx d'Espagne) ; 5 espèces de canidés (dont le loup rouge) ; une dizaine de mammifères aquatiques (6 dauphins d'eau douce, la baleine franche et deux phoques, dont le phoque moine de Méditerranée) ; une douzaine de marsupiaux (dingiso, tenkile et opossums) ; les trois rares et originaux échidnés de Nouvelle-Guinée ; l'éléphant de Sumatra ; 3 équidés et 6 rhinocéros ; une douzaine de bovidés (buffles, antilopes et gazelles) ; un chameau, un cerf et deux sangliers. Il ne manque à cette liste que le proverbial raton laveur, dont on sera heureux d'apprendre qu'il n'est pas menacé pour l'instant.

Au-delà de notre intérêt pour les mammifères, un autre exemple de classe animale en très mauvaise posture à l'heure actuelle est celle des amphibiens. Avec 528 espèces classées en danger critique d'extinction (8 % des espèces surveillées), ils sont proportionnellement deux fois plus nombreux que les mammifères à se presser dans le couloir de la mort. Ce n'est que récemment que l'on a pris conscience de leur situation alarmante, précisément en 1989 lors du premier congrès international qui leur a été consacré à Canterbury en Angleterre. Des communications alarmantes ont conduit les spécialistes à dresser un état des lieux, avec l'aide de l'UICN. Au bout de dix ans d'études, ils ont constaté l'extinction de 9 espèces d'amphibiens sur la période 1980-2000 (contre 5 espèces d'oiseaux et aucun mammifère), mais surtout la disparition apparente d'une *centaine* d'espèces supplémentaires : si elles ne réapparaissent pas dans les toutes prochaines années, il faudra officiellement les déclarer éteintes et le bilan s'alourdira considérablement.

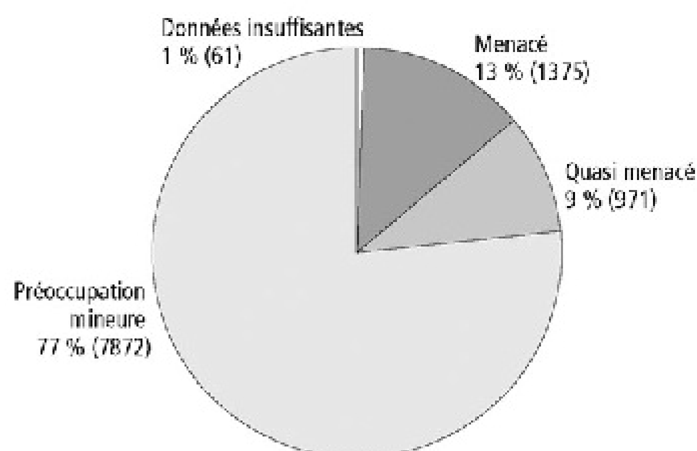
Parmi les causes de cette hécatombe, il y a les facteurs courants, comme la réduction de l'habitat et la chasse intensive de certaines grenouilles comestibles, notamment en Asie, mais il y a aussi l'apparition d'un nouveau phénomène : le « déclin énigmatique » de certaines populations, sortant du cadre des explications habituelles. On verra dans le prochain chapitre que ce sont le réchauffement climatique et ses effets pervers qui rentrent en ligne de compte.

La liste s'allonge

On a détaillé les conditions à remplir pour figurer sur la liste des espèces en danger critique d'extinction. Pour figurer dans une autre catégorie, les critères sont de même nature – taille de la population, taille de l'habitat, tendance à la baisse – avec des seuils moins sévères.

Ainsi, si la population d'une espèce baisse de plus de 80 % en l'espace de dix ans sans que les causes du déclin ne soient enrayées, on a vu que l'espèce était classée en danger critique. Si la baisse de population sur la même période se chiffre entre 50 % et 80 %, l'espèce sera plutôt classée en danger « simple ». Enfin, si la baisse est comprise entre 30 % et 50 %, l'espèce sera jugée seulement « vulnérable ».

Pour les autres catégories de classement (nombre absolu d'adultes reproducteurs, taille de l'habitat), les seuils sont pareillement abaissés par paliers en descendant d'une catégorie à la suivante.



Statut des oiseaux selon l'UICN (données de 2015)

Près d'un quart des espèces (13 + 9 = 22 %) sont menacées ou quasi menacées. Le nombre d'espèces recensées dans chaque catégorie est mentionné entre parenthèses.

www.frenchpdf.com

On notera comme exemple que chez les mammifères, si 209 espèces sont en danger critique d'extinction, 481 sont en danger, et 507 sont vulnérables, en date de 2015, ce qui donne un total d'environ 1 200 espèces menacées (22 % des mammifères), comme nous l'avons déjà évoqué.

Cela, c'est une vision statique de la situation : l'image arrêtée du « film » en 2015. Mais ce qui nous intéresse au premier chef, c'est l'évolution de la situation. D'une année sur l'autre, est-ce que la situation s'aggrave ? Combien d'espèces en danger critique basculent réellement dans l'extinction définitive au recensement suivant ; combien restent en situation critique ; combien connaissent une amélioration et redescendent d'un cran de la catégorie « en danger critique » à la catégorie « danger simple », par exemple ?

L'exemple des mammifères, à nouveau, est édifiant. Si seules une ou deux espèces (comme le dauphin du fleuve Yangzi) ont basculé de la catégorie « en danger critique » à l'extinction réelle au cours des cinq dernières années, la situation s'aggrave néanmoins puisque le nombre d'espèces classées en danger critique a gonflé de 188 en 2010 à 196 en 2012 et à 209 en 2015, soit une augmentation de 10 % sur cette courte période. On peut dire que les mammifères se bousculent au portillon de la mort, sans pour autant faire le saut fatal. L'une des raisons de ce « piétinement » aux portes de l'extinction est que plus la menace pour une espèce grandit, plus les organisations et associations de protection se mobilisent pour la sauver : une sorte de sursis, voire de « grâce » définitive si les efforts déployés aboutissent.

D'autres groupes ont connu moins d'égards, comme les amphibiens. De 2010 à 2015, le nombre des espèces en danger critique d'extinction a gonflé de 486 à 528, soit une augmentation de 8 % environ, et dans nombre de cas on cherche désespérément des survivants : comme on l'a déjà noté, il est à craindre que des dizaines d'espèces n'aient basculé dans l'extinction, car on s'est soucié d'elles trop tard.

La tendance à l'aggravation se répercute en outre à tous les échelons : en restant chez les amphibiens, derrière ceux qui passent d'espèce en danger à espèce en danger critique, il y en a d'autres qui montent d'espèce vulnérable à espèce en danger, et d'autres encore d'espèce quasi menacée à espèce vulnérable. S'il y a quelques rares cas d'espèces qui changent de catégorie dans l'autre sens – vers une amélioration de leur statut – le bilan reste lourdement négatif : en vingt-cinq ans, il se traduit par 662 aggravations de cas en direction de l'extinction.

En élargissant l'analyse à d'autres groupes, Michael Hoffmann, responsable scientifique de l'UICN, et ses coauteurs ont résumé la situation en calculant une moyenne annuelle : ce serait ainsi 13 mammifères, 11 oiseaux et 28 amphibiens qui montent d'un cran vers l'extinction chaque année, soit une cinquantaine d'espèces pour les trois groupes confondus.

La prochaine étape de cette analyse est la plus critique, aux deux sens du terme : la plus importante, parce qu'elle concerne l'avenir du monde vivant ; et la plus ouverte à débat, car elle repose sur des hypothèses et des projections. Il s'agit en effet de projeter les tendances actuelles dans le futur pour estimer à quelle vitesse la biosphère risque de s'effondrer et à quelle échéance la Terre aura essuyé une extinction en masse de ses espèces comparable à celle de la fin des dinosaures, il y a 66 millions d'années.

Compte à rebours vers la grande extinction

Aujourd'hui, si l'on arrête les comptes, on peut encore se rassurer en constatant que la biosphère n'en est toujours pas au stade d'une grande extinction de masse (destruction de 75 % des espèces), comme il n'en est survenu que quatre ou cinq dans l'histoire de la Terre. Nous avons vu au chapitre précédent que les extinctions constatées au cours des temps historiques, voire préhistoriques en incluant le massacre de la mégafaune au sortir du dernier âge glaciaire, ne correspondent qu'à environ 2 % des mammifères et des oiseaux[5], et bien moins pour les autres groupes, avec le bémol bien sûr que nous sommes loin d'avoir répertorié la totalité des extinctions qui ont récemment eu lieu.

En ne tenant compte que du passé et du présent, on est donc loin d'une extinction de masse. En revanche, le point de vue est tout autre si on considère la liste des espèces menacées : la liste rouge de l'UICN. Vu la dynamique de changements de statut des espèces vers le pire, constatée d'année en année, on peut poser l'hypothèse qu'elles sont condamnées à court terme et s'éteindront, par exemple avant la fin du siècle.

C'est l'exercice de style auquel se sont livrés Anthony Barnosky de l'université de Berkeley en Californie et ses onze coauteurs dans un article publié en 2011. Les chercheurs partent du principe que toutes les espèces listées en danger critique (label CR) disparaîtront au cours du siècle ; qu'elles seront remplacées dans le « couloir de la mort » par des espèces montées des catégories inférieures (celles pour le moment en danger simple, par exemple) ; et que ces remplaçantes disparaîtront à leur tour au siècle suivant. En se basant sur ces hypothèses, l'équipe de Berkeley projette que les trois quarts des espèces d'amphibiens auront disparu en l'espace de 900 ans, les trois quarts des mammifères en 1 500 ans, et les trois quarts des oiseaux en 2 250 ans environ.

C'est préoccupant, mais on voit que ce seuil de « grande extinction de masse », comparable à la catastrophe de la fin du Crétacé (75 % des espèces détruites), se situe *un à deux millénaires* dans le futur.

www.frenchpdf.com

Sur la foi de ce calcul, on pourrait continuer à faire l'autruche (laquelle, au passage, n'est pas encore une espèce menacée) et sans se soucier de l'avenir, proclamer comme le fit Louis XV en son temps : « après moi, le déluge ».

Barnosky et ses confrères ont toutefois calculé en parallèle combien de disparitions pourraient survenir au XXI e siècle si, au lieu de ne considérer que les espèces *en danger critique*, ils intégraient dans leur estimation toutes les espèces *menacées* – en danger critique, en danger et vulnérables – avec comme dans l'exercice précédent une disparition en l'espace d'un siècle et un remplacement des exécutés par une nouvelle charrette d'espèces montées des catégories inférieures et qui grimperaient sur l'échafaud au siècle suivant.

Dans ce scénario plus drastique, il suffit de 240 ans pour perdre les trois quarts des amphibiens, 330 ans pour la même perte de mammifères, et 540 ans pour celle des oiseaux (en arrondissant à dix ans près). Si notre génération, nos enfants et nos petits-enfants ne risquent toujours pas de vivre cette époque charnière où l'humanité aura fini par massacrer tout autant d'espèces que l'astéroïde du Yucatán, on voit que l'horizon s'est dangereusement rapproché au point de nous faire hausser les sourcils.

Bien sûr, il s'agit d'un exercice de style qui repose sur plusieurs postulats difficiles à juger, et les chercheurs le reconnaissent bien volontiers. D'une part, est-ce que les espèces dans le couloir de la mort – couloir restreint si ne sont condamnées que les espèces en danger critique, couloir élargi si toutes les espèces menacées font partie de la charrette – vont effectivement périr ? Le délai moyen de 100 ans pour leur exécution est-il bien choisi, trop long ou trop court ? Et les exécutés seront-ils remplacés au même rythme par de nouveaux prétendants venus des classes inférieures ?

On peut être optimiste et penser que les mesures de conservation que l'on prendra pourront ralentir l'hécatombe et repousseront la déclaration de grande extinction de masse aux calendes grecques.

On peut aussi redouter que ce sera plutôt l'inverse. Des mesures de conservation ont été prises depuis plusieurs décennies et la situation ne fait pourtant qu'empirer, quoique moins vite, on le verra, que si rien n'avait été fait. On peut se réjouir par exemple de la stabilisation temporaire de la population des tigres du Bengale. Mais force est de constater que depuis que Barnosky et ses confrères ont fait leurs calculs en 2011, la liste des vertébrés en mauvaise posture (qu'ils soient en danger critique ou simplement menacés) s'est allongée de 5 % en cinq ans.

Il y a plus grave encore. Toutes ces projections sont fondées sur le postulat que rien ne changera en profondeur dans une dynamique somme toute *linéaire* des extinctions, que leurs causes resteront les mêmes, avec les mêmes effets. Mais le vrai problème, qui peut mener à la catastrophe tant redoutée, c'est que des causes nouvelles de détérioration de l'écosystème viennent s'ajouter aux précédentes, les amplifiant ou entraînant des réactions en cascade pour mener à un effondrement *accéléré* de la biosphère. Or nous avons déjà introduit un tel agent amplificateur : il s'agit bien sûr du réchauffement climatique.

1.

Source : Internet, ma traduction.

2.

Il semblerait qu'un tigre isolé ait besoin de 100 km^2 pour survivre (c'est la surface de Paris *intra muros*). Pour qu'il puisse se reproduire, une population d'une dizaine d'individus mâles et femelles est souhaitable, ce qui implique 1 000 km^2 d'espace ininterrompu (la surface de la Martinique).

3.

Le rapport mathématique réduction des espèces/réduction de l'habitat est encore modeste, car la forêt n'est détruite qu'à 15 %, mais il risque de grimper à mesure que la déforestation continue et que la fragmentation découpe des « îlots de survie » de plus en plus petits.

4.

Portail français de l'UICN : uicn.fr/ ; site en anglais et base mondiale de données : iucnredlist.org/.

5.

Pour les oiseaux, les pertes pourraient toutefois être de 11 % si l'on s'appuie sur les études statistiques de R. Duncan et al. dans les îles du Pacifique, voir page 160.

www.frenchpdf.com

7

Réchauffement climatique et autres effets pervers

Rien qu'en agissant directement sur la biosphère – chasse et pêche excessives, déforestation et urbanisation, espèces invasives – l'homme peut donc déclencher une extinction de masse des espèces vivantes, comparable à celle de la fin des dinosaures, en l'espace d'un ou deux millénaires, voire en quelques siècles seulement dans le pire des cas, si les tendances actuelles se poursuivent sans changement révolutionnaire dans nos comportements.

C'est déjà alarmant en soi, mais ce n'est que le modèle de base, sans toutes les options qui peuvent s'y rajouter et transformer notre modeste charrette des condamnés en grand char de l'apocalypse.

Dans son expansion industrielle et agricole, l'homme moderne déclenche en effet des phénomènes indirects qui sont des sources de stress supplémentaires pour la biosphère, à commencer par l'effet de serre et le réchauffement climatique.

On connaît le phénomène : certains gaz de l'atmosphère ont la propriété de laisser passer la lumière du Soleil qui chauffe le sol et l'eau des océans, mais bloquent les ondes de chaleur – les rayons infrarouges – qui tentent de repartir dans l'autre sens vers l'espace. C'est ce que font, à petite échelle, les vitres d'une serre ou d'une voiture. Deux gaz mineurs de l'atmosphère terrestre ont cette faculté d'amasser ainsi la chaleur : la vapeur d'eau (H_2O) et le dioxyde de carbone, communément appelé gaz carbonique (CO_2). D'autres gaz sont encore plus efficaces à ce jeu infernal, mais ne sont naturellement présents dans l'atmosphère qu'à l'état de traces, comme le méthane (CH_4), le protoxyde d'azote (N_2O), l'ozone (O_3) et les composés à base de chlore, fluor et carbone (CFC).

La vapeur d'eau, on l'ignore souvent, est responsable des deux tiers de l'effet de serre naturel, mais elle s'autorégule : elle se heurte à un plafond – son point de saturation – où elle se condense en neige ou en pluie et retombe au sol. En outre, en se condensant en nuages, elle réfléchit la lumière et joue aussi un rôle réfrigérant, en contrepoint à son rôle réchauffant.

Le dioxyde de carbone est responsable du dernier tiers de l'effet de serre naturel. Dégazé entre autres par les volcans, il a toujours été abondant dans l'atmosphère des planètes et les réchauffe considérablement. Un exemple extrême est la planète Vénus, plus proche que nous du Soleil, et dont l'épaisse atmosphère de gaz carbonique – 90 bars de pression[1] – fait grimper la température à plus de 450 °C (jour et nuit d'ailleurs : c'est ce qui s'appelle une canicule !).

La Terre a évité un sort identique car, plus loin du Soleil, sa température de départ a été suffisamment clémente pour que sa vapeur d'eau se condense en océans et que la grande majorité du dioxyde de carbone s'y soit dissoute. Ce qu'il en reste dans l'atmosphère est donc une fraction infime du total, fraction variable au demeurant selon l'activité des volcans, et selon ce qui est absorbé ou relâché par les océans et par la végétation. C'est en effet le dioxyde de carbone qui est exploité par les plantes et par le plancton lors de la photosynthèse : à leur mort, ces organismes le restituent à l'atmosphère ou peuvent l'entraîner dans leur tombe s'ils se déposent rapidement au fond des marais ou des océans pour être ensevelis sous forme de sédiments. C'est ainsi que naissent les gisements de « carburants fossiles » que sont le charbon, le pétrole et le gaz naturel.

L'effet de serre naturel, finement régulé par toutes les interactions complexes de la planète Terre, a du bon : sans les quelques centièmes de pour-cent présents dans notre atmosphère – 280 ppm ou « parties par million[2] » avant l'ère industrielle, soit 0,028 % – la température moyenne à la surface de la Terre serait de – 18 °C et les océans seraient gelés. Grâce à l'intervention de notre dose naturelle de dioxyde de carbone, cette moyenne est de + 15 °C, soit 33 degrés Celsius de plus.

On peut supposer que la biosphère n'est pas étrangère à ce délicat équilibre. Les formes de vie, par des réajustements inconscients et automatiques, peuvent contrôler le taux atmosphérique de dioxyde de carbone à leur avantage, avec une certaine marge de manœuvre – certaines époques géologiques ont été plus chaudes ou plus froides que l'actuelle, tout en soutenant une biosphère en bonne santé – et avec aussi un certain nombre d'accidents où le système Terre s'est déréglé. Nous avons évoqué au chapitre 3 le maximum de température du Paléocène-Éocène, il y a 56 millions d'années, lorsque celle-ci a grimpé d'environ 5 °C durant 200 000 ans. Nous avons également évoqué les âges glaciaires, quand la croissance des glaces continentales et des banquises a réfléchi plus de lumière solaire que d'habitude – une baisse de température qui n'a pas été compensée par un relâchement biologique de dioxyde de carbone pour rattraper l'affaire. Si jamais la biosphère module bien le climat terrestre à son avantage[3], force est de reconnaître qu'il y a donc quelques couacs.

On peut d'ailleurs s'amuser à imaginer des scénarios décoiffants, comme l'ont fait Felisa Smith de l'université du

www.frenchpdf.com

Nouveau-Mexique et ses deux complices de l'institut Smithsonian de Washington et du laboratoire national de Los Alamos. La fine équipe a relevé que la chute spectaculaire de température il y a 12 000 ans (l'événement du Dryas récent), qui a retardé notre sortie de l'âge glaciaire, coïncide avec une chute marquée du méthane atmosphérique (un tiers de pertes en quelques siècles), ainsi qu'avec le massacre de la mégafaune dans les Amériques.

Les trois chercheurs se sont fait la réflexion que mammouths, bisons et autres herbivores géants produisaient justement des quantités importantes de méthane (à l'heure actuelle, notre bétail domestique est d'ailleurs responsable pour 20 % du stock atmosphérique de ce puissant gaz à effet de serre). Le massacre rapide de tous ces grands mammifères par l'homme pourrait justifier, selon leurs calculs, une partie conséquente, voire la totalité, du rapide déclin qu'a connu le méthane à cette époque. En forçant le trait, ce serait donc l'arrêt des flatulences de mammouths qui aurait causé le refroidissement de la Terre lors de l'événement climatique du Dryas.

Ce n'est qu'une hypothèse de travail que se sont amusés à échafauder les chercheurs, mais elle est tout à fait recevable. Elle illustre en tout cas à quel point le système climato-biologique de la Terre est fragile, complexe et méconnu. Et que jouer aux apprentis sorciers avec le climat peut être lourd de conséquences.

L'homme responsable du réchauffement climatique

Que l'homme puisse accentuer l'effet de serre avec ses propres émanations de gaz carbonique n'est pas une idée nouvelle. L'hypothèse fut soulevée dès 1903 par le chimiste suédois Svante Arrhenius (futur Prix Nobel) qui calcula qu'un doublement de la quantité de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, à travers nos activités industrielles, pourrait rehausser la température planétaire de 4 à 6 °C, ce qui correspond tout à fait aux calculs actuels. À l'époque, cette éventualité n'est pas du tout perçue comme un problème, bien au contraire : on se méfie du péril inverse – l'éventualité d'un nouvel âge glaciaire – et l'industrie triomphante fait donc figure de rempart contre les attaques de Dame Nature.

Les effets de notre industrie naissante ont tardé à se faire sentir, parce que l'explosion de la population mondiale et de son train de vie est surtout intervenue après la Seconde Guerre mondiale, et parce que l'inertie du système Terre a probablement joué un rôle modérateur au début (absorption d'une partie du dioxyde de carbone par les océans, notamment). Ce n'est qu'au milieu des années 1970 qu'une inflexion notable des températures est remarquée : le rôle des activités humaines est mis en avant lors d'une première conférence internationale sur le climat, tenue à Genève en 1979. Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du Climat (GIEC), fondé en 1988 et qui fédère aujourd'hui 2 500 chercheurs du monde entier, réunit alors les données, tant des concentrations de gaz à effet de serre que des températures mondiales, échafaude des modèles et des projections, et les passe au crible de la critique.

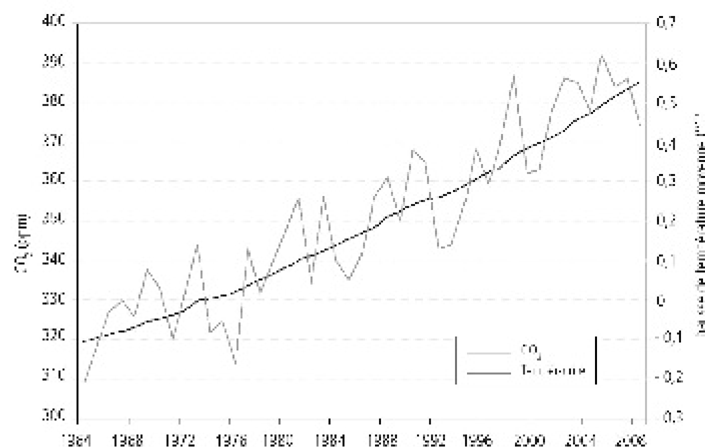
Certains lobbies et groupes d'influence ont eu tendance à caricaturer ce groupe international d'experts comme étant alarmiste, exagérant le réchauffement climatique (ou l'inventant tout simplement) et l'imputant sans preuves solides aux activités humaines.

En réalité, le GIEC a été très mesuré dans ses analyses et ses conclusions, péchant presque par excès de prudence et laissant toujours place au doute, comme il est de mise dans le débat scientifique. Son premier rapport, publié en 1990, souligne d'ailleurs l'absence de certitudes à cette époque, et seul un soupçon de responsabilité humaine. Reconduite tous les cinq à six ans, ce n'est que progressivement que l'enquête du GIEC va exposer le rôle de l'homme, en amassant des faisceaux d'indices de moins en moins contestables, la probabilité qu'il n'y ait pas de lien entre l'homme et le réchauffement climatique s'amenuisant au fil des analyses.

Ainsi, dans le deuxième rapport du GIEC publié en 1995, on lit : « un faisceau d'éléments suggère une influence perceptible de l'homme sur le climat global » ; et dans le troisième rapport, en 2001, « de nouvelles preuves, mieux étayées que par le passé, viennent confirmer que la majeure partie du réchauffement climatique observé ces cinquante dernières années est imputable aux activités humaines ».

En 2007, nouveau resserrement des certitudes et de l'ampleur du rôle de l'homme, puisque ce n'est plus la majeure partie du réchauffement, mais « l'essentiel du réchauffement [...] qui est *très vraisemblablement* dû à l'augmentation observée des gaz à effet de serre anthropiques[4] ». En langage scientifique, le « *très vraisemblablement* » a une valeur statistique : ici, il signifie qu'il y a 9 chances sur 10 (90 % de certitude) que la relation de cause à effet soit réelle, les experts ne laissant guère de place au doute.

www.frenchpdf.com



CO_2 et température de l’atmosphère (1964 à 2008)

La hausse de température (pointillés en dents-de-scie) de l’atmosphère terrestre est étroitement liée à celle de sa teneur en dioxyde de carbone (trait plein ; ppm = partie par million). (D’après skepticalscience.com.)

C’est d’ailleurs ce que confirme le cinquième rapport du GIEC, publié en 2013-2014, où la responsabilité de l’homme est qualifiée désormais d’*extrêmement probable*, le niveau de certitude atteignant désormais 95 %. Le temps n’est plus à se poser des questions et à noyer le poisson. Comme le résume alors Ban Ki-moon, secrétaire général des Nations unies : « La science a parlé. Il n’y a aucune ambiguïté sur son message. Les gouvernements doivent agir. Le temps joue contre nous. »

Les doutes émis par les non-spécialistes sur la réalité du réchauffement et sur la responsabilité de l’homme dans cette affaire ont en effet retardé ou du moins émoussé la prise de conscience du problème. Si cette opposition des « climato-sceptiques » est tout à fait acceptable et même bienvenue dans une société démocratique, elle est en revanche malsaine lorsqu’elle est soutenue par des lobbies industriels ou politiques dont la finalité est d’empêcher que ne soient remis en cause des comportements de grande consommation et, on l’aura compris, d’engrangements de bénéfices. Certains de ces lobbies ont su s’entourer de scientifiques populaires (non spécialistes du climat, rappelons-le, pour la plupart) pour donner une crédibilité à leurs thèses et à leurs démonstrations. Si celles-ci ne résistent pas à un examen approfondi des spécialistes, elles laissent le public non averti sur l’impression que rien n’est prouvé et que la responsabilité de l’homme en la matière reste discutable, voire rejetable.

Ainsi, on a vu en France comment un ancien ministre de la Recherche, Claude Allègre pour ne pas le nommer, a remis en cause dans des ouvrages populaires le rôle de l’homme dans le réchauffement climatique. Dans la même mouvance, le directeur à l’époque de l’Institut de physique du globe de Paris (IPGP), Vincent Courtillot, a soutenu avec plusieurs confrères que les variations de température sur Terre au XXe siècle étaient liées principalement aux variations d’activité du Soleil (et à celles du champ magnétique terrestre), démonstration « scientifique » à l’appui. Erreurs et données incomplètes ont valu à cette thèse d’être rejetée par la communauté scientifique internationale[5].

Heureusement pour la réputation de la France, nous avons en contrepartie de très bons experts du climat, à commencer par Jean Jouzel, vice-président du groupe scientifique du GIEC, qui œuvre avec son équipe pour étudier avec autant d’objectivité que possible le réchauffement climatique et son évolution.

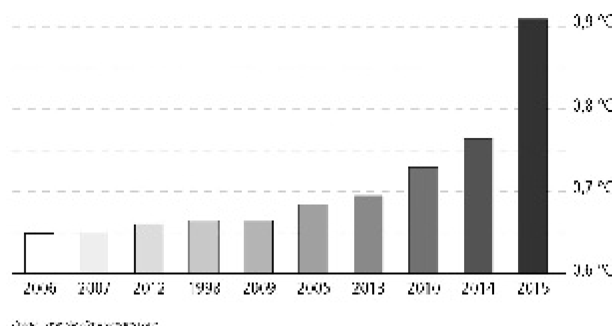
On est capable de disséquer ce réchauffement anthropique avec précision. Ainsi, la hausse de température de la planète est estimée à 0,6 °C au cours du XXe siècle. Comme c’est une moyenne, certaines régions sont moins touchées et certaines plus touchées que d’autres, notamment la France qui a connu une hausse séculaire de 0,9 °C.

Cette hausse de la température mondiale continue. On en a l’expérience directe, puisque l’année 2015 a été la plus chaude depuis le début des relevés historiques (en 1880), le précédent record datant de l’année 2014 (!) ; et qu’à une exception près (1998), les dix années les plus chaudes enregistrées sont toutes postérieures à l’an 2000, avec notamment des « grands crus » en 2015, 2014, 2010, 2013 et 2005 (par ordre décroissant).

Le réchauffement atteint désormais 0,13 °C par décennie, c’est-à-dire que si ce taux restait constant, on enregistrerait une augmentation de 1,3 °C supplémentaire au XXIe siècle. Mais le problème risque encore de s’amplifier. En se basant sur le rejet continu, voire croissant, de gaz à effet de serre (2 % de plus par an entre 2000 et 2010), le GIEC a publié dans son rapport de 2014 que dans le cas le plus pessimiste, mais néanmoins probable car il correspond à la prolongation des émissions actuelles, la température moyenne à la fin du XXIe siècle augmentera non pas de 1,3 °C, mais de 2 à 4 °C par rapport à aujourd’hui : au total, cela représentera alors une

www.frenchpdf.com

augmentation de 3 à 5 °C par rapport aux températures de la fin du XIX e siècle, lorsqu'ont commencé à se faire sentir les effets de l'ère industrielle. Seul un changement de mentalité économique et politique majeur, visant à réduire l'émanation de gaz à effet de serre, pourra freiner cette augmentation.



Les dix années les plus chaudes de l'histoire

Écart en degrés Celsius par rapport à la température moyenne du XX e siècle. (D'après climatecentral.org.)

On connaît en effet, nous l'avons vu, les agents responsables, à commencer par l'augmentation du dioxyde de carbone. La concentration de ce gaz dans notre atmosphère était de 280 ppm au début de l'ère industrielle ; elle a atteint 350 ppm en 1990, pour franchir la barre des 400 ppm en 2015, soit une augmentation de plus de 40 % en un peu plus d'un siècle.

Ce dioxyde de carbone vient principalement de notre combustion de carburants fossiles, car on y retrouve la signature isotopique de ceux-ci (charbon, gaz naturel et pétrole sont enrichis en carbone 12). Du reste, on peut estimer indépendamment les quantités de dioxyde de carbone rejetées par les activités humaines : elles dépassent aujourd'hui 35 milliards de tonnes par an6, dont 30 % proviennent de nos centrales électriques (notamment à charbon), 20 % de l'industrie, 19 % des transports, 13 % du chauffage et de la climatisation des bâtiments, 9 % de la déforestation et de l'agriculture et 9 % des pertes subies dans l'extraction et la distribution des carburants. Ces émissions humaines correspondent bien à l'augmentation de la quantité de CO_2 effectivement mesurée dans l'atmosphère.

Tordons le cou au passage à un mythe entretenu par certains climato-sceptiques, à savoir que les volcans de la Terre émettent autant ou plus de dioxyde de carbone que les activités humaines. Ce mythe a été entretenu par plusieurs géologues aux motivations discutables, notamment Ian Plimer de l'université d'Adélaïde qui en a tiré un best-seller. La réalité est tout autre : en intégrant tous les volcans du globe (tant sur les continents que sous les mers), les volcanologues estiment leur production annuelle totale de CO_2 à moins de 300 millions de tonnes par an, c'est-à-dire *moins du centième* (< 1 %) de ce que rejettent les hommes.

Pour en revenir aux émissions anthropiques, le dioxyde de carbone n'est pas notre seul gaz à effet de serre. Il y a aussi le méthane qui provient de la décomposition bactérienne dans nos rizières et dans l'estomac de notre bétail ruminant (30 % du réchauffement climatique, contre 55 % pour le CO_2) ; et à titre accessoire le protoxyde d'azote émis notamment par la décomposition de nos engrais agricoles (5 % du réchauffement).

Tous ces gaz sont en augmentation dans notre atmosphère, et avec eux l'effet de serre. Si ce réchauffement dû à l'homme ne vaut pour l'instant qu'un degré Celsius environ, ses effets sont déjà notables au niveau des perturbations climatiques tous azimuts – sécheresses dans certaines régions, inondations dans d'autres, fonte des glaciers et élévation du niveau marin –, effets qui ont été amplement décrits dans d'autres ouvrages. Mais ce qu'il convient de souligner ici, ce sont les conséquences déjà notables du réchauffement sur les plantes et les animaux, et l'avenir qu'il nous réserve en termes d'extinctions supplémentaires d'espèces vivantes.

Effet de serre et biosphère

On pourrait croire qu'un degré Celsius n'a pas grand effet sur l'équilibre de la biosphère, la Terre étant déjà passée par des balancements beaucoup plus conséquents du climat avec des effets somme toute modestes, les grandes extinctions du passé étant plutôt attribuées à des causes plus spectaculaires, comme l'impact d'un astéroïde pour celle de la fin du Crétacé.

Des changements importants de l'écosystème à l'échelle de la planète se déclarent toutefois à partir d'une variation de 4 à 5 °C : c'est en effet la différence de température globale entre un âge glaciaire et un âge interglaciaire, ou encore la hausse de température de la transition Paléocène/Éocène il y a 56 millions d'années, lorsqu'un bouleversement des espèces de mammifères est documenté (voir page 87). Or une telle hausse de température pourrait fort bien se concrétiser *avant la fin du siècle*, si nous n'y prenons pas garde, sur la foi de la croissance

www.frenchpdf.com

actuelle de notre population, de notre consommation et des rejets de gaz à effet de serre.

Mais avant d'évoquer cette hypothèse extrême, et malheureusement probable, le niveau de réchauffement actuel porte déjà à conséquence. Pour le comprendre, il faut d'abord prendre conscience qu'un degré Celsius, cela représente énormément de calories supplémentaires stockées dans l'atmosphère – doublé du fait qu'une partie supplémentaire est stockée dans les océans. Dans le détail, cet excès est d'autre part inégalement réparti. Certaines régions connaissent une hausse beaucoup plus élevée que la moyenne, comme l'Arctique où la hausse est de + 2,5 °C.

En quoi cela pourrait-il bien déranger la biosphère ?

Chaque plante, chaque animal vit dans une certaine fourchette de température et d'humidité ambiantes que l'on pourrait appeler son « enveloppe climatique ». Chaque animal dépend en outre d'autres espèces, par exemple pour son alimentation, qui ont également leur fourchette vitale. Au niveau temporel, les espèces dépendent aussi du climat pour caler leur cycle de vie, que ce soit les dates de floraison des plantes ou de maturation des fruits, celles des rencontres nuptiales ou de mise bas des petits chez les animaux, sans compter le signal de départ des espèces migratrices. C'est ce qu'on appelle la *phénologie* des espèces.

Tout cela est finement synchronisé à l'échelle d'un écosystème. Un aléa météorologique peut déstabiliser temporairement cet équilibre, avec un rattrapage l'année suivante ; un changement climatique rapide et irréversible peut en revanche détricoter le tissu complexe d'interactions et d'interdépendances au sein de la biosphère.



Les amphibiens sont particulièrement affectés par le réchauffement climatique – un stress auquel se greffent des maladies comme la chytridiomycose, causée par un champignon parasite. (© Forrest Brem, tirée de Gewin V., « Riders of a modern-day Ark », *PloS Biology*, vol. 6 (1), e24 [CC BY-SA 2.5].)

L'une des premières études sur le sujet fut conduite par Alan Pounds et son équipe du Centre de sciences tropicales et de préservation de la forêt de nuage de Monteverde au Costa Rica. Il s'agit d'un biotope particulier vers 1 500 mètres d'altitude où stagne un banc nuageux : durant la saison sèche, l'humidité qu'il procure est salutaire pour de nombreuses espèces, notamment les amphibiens. Or le réchauffement climatique qui a commencé à se faire sentir sur la côte pacifique à la fin des années 1970 a conduit à une élévation du plafond nuageux, coupant le « brumisateur » sur la forêt concernée et réduisant considérablement le débit des ruisseaux. Il s'est ensuivi un effondrement des populations d'amphibiens et de reptiles – populations qui ont fluctué d'une année sur l'autre selon l'importance de la sécheresse. Certaines espèces ont fini par s'éteindre pour de bon, comme le crapaud doré (*Bufo periglenes*) et plusieurs espèces de grenouilles arlequins (genre *Atelopus*).

Comment et pourquoi ces amphibiens ont-ils été si durement touchés ? On touche ici au nœud du problème : l'effet domino qu'un phénomène peut déclencher en favorisant d'autres facteurs négatifs. Dans la forêt de Monteverde, il fut découvert en 1983 que la sécheresse avait forcé les grenouilles à se rassembler autour de rares chutes d'eau où des mouches parasites les attaquaient pour y injecter leurs œufs : les chercheurs y ont observé des dizaines de grenouilles mortes ou moribondes, ce qui leur a mis la puce à l'oreille (façon de parler).

Au-delà du Costa Rica, un déclin « énigmatique » de nombreuses populations d'amphibiens s'est également manifesté en Équateur, au Brésil, au Pérou et au Chili, ainsi qu'en Australie, en Nouvelle-Zélande et en Tanzanie, et il atteint même l'Europe. Apparemment c'est aussi un élément pathogène qui est incriminé, mais cette fois un champignon parasite – le chytride – qui infecte la peau des amphibiens. Si le réchauffement climatique peut favoriser la propagation du champignon ou constituer un facteur de stress favorable à la maladie chez l'hôte

www.frenchpdf.com

amphibien, il s'avère surtout que le principal responsable serait une espèce invasive de grenouille venue d'Afrique du Sud, le xénope lisse, porteur du champignon. Animal de laboratoire, il aurait franchi les frontières avec facilité. L'usage de pesticides aurait également pu faire muter la moisissure elle-même, bénigne à l'origine, en un vecteur hautement pathogène.

Plus près de nous, dans la classe des mammifères, on a l'exemple du saïga. Cette antilope d'Eurasie, on s'en souvient (voir page 202), est traquée par les braconniers et sa population est tombée d'un million de têtes dans les années 1990 à moins de 50 000 en 2003. L'alarme ayant été déclenchée, l'animal a alors bénéficié d'une protection accrue et sa population s'est mise à remonter, dépassant vraisemblablement 250 000 têtes en 2014. Or funeste surprise : début 2015, on retrouve 200 000 cadavres de saïgas dans les steppes du Kazakhstan, abattus par un mystérieux fléau. Les premières explications avancées par les chercheurs incriminent le dérèglement climatique, avec des tempêtes et chutes de neige en mai qui auraient stressé l'animal au point de favoriser une épidémie éclair : l'effondrement de leur système immunitaire attaqué par la bactérie *Pasteurella*. Là aussi, comme pour les grenouilles du Costa Rica, le dérèglement climatique aurait servi de détonateur à un mécanisme destructeur.

La migration comme réponse au réchauffement

Les effets pervers du réchauffement climatique découlent du fait que la grande majorité des espèces animales et végétales ne vivent correctement que dans cette fourchette précise de température et d'humidité qu'est leur « enveloppe climatique ». Si celle-ci est perturbée, le stress subi par l'espèce augmente, au point où elle devient davantage vulnérable à d'autres facteurs négatifs comme la pollution, les espèces invasives et les éléments pathogènes.

Qu'à cela ne tienne, dira-t-on, si les espèces ne sont pas contentes, elles n'ont qu'à déménager. Et il est vrai qu'en vertu du réchauffement, les isothermes et autres lignes d'égales conditions migrent à la surface de la Terre, d'une part en latitude vers les pôles, et d'autre part dans les montagnes en altitude vers l'amont. Pour qu'elle reste satisfaite, il incombe donc à une espèce, qu'elle soit animale ou végétale, de suivre le déplacement d'année en année de son enveloppe climatique.

Ce déplacement des écosystèmes suite au réchauffement climatique est une réalité. Une étude édifiante en la matière fut conduite dans les montagnes du Vermont, au nord-est des États-Unis. Mieux qu'en plaine, où un écart de température de 1 °C peut s'étirer sur des dizaines ou des centaines de kilomètres, cette zone montagneuse affiche le même écart sur un dénivelé de l'ordre de 150 à 200 mètres seulement : on voit de façon beaucoup plus tranchée le remplacement progressif de la végétation – et notamment des essences d'arbres – lorsqu'il y a une hausse de température.

Les montagnes Vertes du Vermont (on se demande comment l'État a reçu son nom) avaient fait l'objet d'une étude forestière très complète en 1964. En la répétant en 2004, et en s'appuyant pour la période intermédiaire sur des photographies aériennes et satellite, Brian Beckage de l'université du Vermont et son équipe ont pu mesurer l'amplitude et la vitesse de changement du couvert végétal dû au réchauffement climatique (d'autant que le milieu n'a pas été altéré par l'homme, en vertu de son statut de forêt fédérale protégée).

Pour mesurer ce changement, le curseur tout trouvé était la frontière à flanc de montagne entre la forêt de feuillus en bas de pente (principalement hêtres et érables) et la forêt boréale en haut de pente (épicéas et bouleaux), transition qui s'effectue sur moins de 200 mètres de dénivelé, vers 800 mètres d'altitude, et se voit de loin sous la forme d'un net changement de teinte de la forêt (clair en bas, sombre en haut).

Les chercheurs ont constaté qu'en quarante ans, en réponse au réchauffement, la forêt boréale s'est repliée en altitude (a donc diminué de surface), remplacée par la montée progressive des érables, la frontière entre les deux écosystèmes ayant grimpé d'environ 100 mètres.

Cela montre à quelle vitesse les arbres peuvent dépérir lorsque leur enveloppe climatique les abandonne, alors que graines et jeunes pousses des espèces favorisées viennent les remplacer. Cela étant, le réchauffement climatique est plus rapide que la vitesse de migration des arbres : les modèles indiquent qu'à l'équilibre, sur la base de 1 °C de réchauffement, la frontière entre les deux types de forêt aurait dû migrer de 200 mètres vers l'amont – le double de ce qui est effectivement observé. Les arbres sont donc à la traîne : ils n'ont pas encore appris à courir.

Pour ce qui est des animaux, une étude équivalente a été menée dans le parc national de Yosemite en Californie. Là aussi, les chercheurs disposaient d'une étude ancienne et très détaillée, consacrée aux petits mammifères du massif montagneux sur 3 000 mètres de dénivelé, conduite de 1914 à 1920 par le zoologiste Joseph Grinnell[7]. Craig Moritz et ses confrères de l'université de Berkeley ont répété l'étude près d'un siècle plus tard, de 2003 à 2006, en plaçant pareillement des pièges à petits mammifères tout le long de la montagne. Ils comptaient documenter ainsi leurs éventuels changements d'altitude en réponse au réchauffement climatique.

Sur les versants de Yosemite, les températures minimales ont grimpé de plus de 3 °C en un siècle, un bon exemple d'amplification locale du réchauffement[8] : là aussi, on peut supposer que c'est la raison principale du déplacement des animaux, peu inquiétés par d'autres facteurs humains, puisque protégés dans le cadre d'un parc national.

www.frenchpdf.com

Comme pour les arbres du Vermont, les espèces peu tolérantes à la chaleur, et déjà haut perchées, se sont réfugiées encore plus en amont pour chercher de la fraîcheur : c'est le cas notamment du tamia ou *chipmunk* alpin, de l'écureuil de Belding ou du lièvre siffleur, qui subissent ainsi une contraction de leur habitat. Quant aux espèces de bas de montagne, la moitié d'entre elles ont profité au contraire du réchauffement pour coloniser, en plus de leur habitat de base, des versants de plus en plus élevés, étendant ainsi leur domaine.

Cette montée progressive des petits mammifères s'est faite sur 500 mètres de dénivelé en un siècle (valeur moyenne pour la douzaine d'espèces étudiées), ce qui correspond exactement à une différence de 3 °C entre les deux niveaux : la « longue marche » des petits rongeurs reflète donc parfaitement la progression du réchauffement climatique.

Cependant, il y a un petit problème dans cette ascension des montagnes pour fuir la chaleur, tant des plantes que des animaux : plus on monte, moins il y a d'espace. En caricaturant, vient un moment où tout le monde se retrouve au sommet et où on ne peut pas monter plus haut, à moins de savoir voler. Moins visuelle, mais tout aussi réelle, la migration en plaine vers les hautes latitudes se heurte aussi à une limite, à savoir le rivage boréal (ou austral) du continent concerné. Là aussi c'est une impasse, à moins de savoir nager.

La marche forcée des espèces

Déjà suffisamment perturbés par les activités humaines, plantes et animaux doivent donc composer avec le réchauffement climatique pour survivre. Au-delà des cas d'école, que nous avons vus à Yosemite et dans le Vermont, la tendance est générale sur toute la planète, tant sur terre que dans les airs et dans les mers. Dès 2003, une étude conduite sur une centaine de plantes alpines, papillons et oiseaux de l'hémisphère Nord trouve en moyenne une montée en altitude de 6 mètres par décennie pour les plantes, et une migration de 6 kilomètres par décennie (600 mètres par an) vers le nord pour les papillons et les oiseaux.

Certaines migrations sont encore plus rapides, comme celles de nombreuses espèces d'oiseaux en Grande-Bretagne qui ont déplacé leur habitat vers le nord au rythme de 10 kilomètres par décennie (1 kilomètre par an). Le record appartient au plancton marin : certains copépodes – de minuscules crustacés flottant entre deux eaux – se sont décalés vers les pôles de près de 1 000 kilomètres en quarante ans, soit à la vitesse moyenne de 25 kilomètres par an. Le monde marin, cela étant, est un milieu spécial où les changements de température sont étalés sur de grandes distances et où de vifs courants permettent une propagation rapide des espèces.

Sur la terre ferme, le déplacement des espèces, surtout végétales, est bien plus difficile. En plaine, il faudrait qu'elles puissent le faire au rythme de 500 mètres à un kilomètre par an pour suivre la progression moyenne des courbes de température, et si nous avons vu que papillons et oiseaux parviennent à tenir ce rythme, ce n'est pas le cas pour tout le monde. On aurait tort en effet de penser qu'il suffit à un animal de parcourir cette distance pour rester en phase avec son environnement idéal, déplacement qui se résume à deux ou trois mètres par jour, à la portée du plus lent des escargots. Le problème, c'est que tout l'environnement de l'animal (et notamment sa nourriture) doit en faire de même, et c'est donc la migration des plantes qui dicte le tempo.

Or un kilomètre par an, cela frise la limite de ce que la végétation est capable d'accomplir. Cela correspond d'ailleurs à la vitesse de remontée des arbres vers le nord il y a 11 000 ans, au sortir très rapide du dernier âge glaciaire. Aller plus vite posera problème et certains biotopes terrestres risquent d'être sérieusement pénalisés, car le déplacement des isothermes n'est pas le même selon les régions, et selon que l'on soit en milieu humide, dans le désert ou en forêt. Seront particulièrement sous pression les prairies humides et les savanes où le rythme projeté du changement climatique au XXIe siècle implique que pour rester à égale température, le couvert végétal et ses animaux devront migrer vers le nord à 1,25 kilomètre par an, ce qui paraît très difficile, sinon impossible à réaliser.

Scott Loarie et ses collègues de Stanford et de Berkeley, auteurs d'une étude sur la question, soulignent ainsi que près de 30 % des surfaces continentales seraient affectées par de tels excès de vitesse (plus d'un kilomètre par an) dans le déplacement des isothermes, déplacement climatique que la végétation et sa panoplie d'animaux ne sauraient suivre.

Et encore, il s'agit là d'une course vers le pôle « sur le plat », comme s'il n'y avait pas d'obstacles. Sur un tel parcours idéal, la biosphère parviendrait peut-être à s'adapter, ou en tout cas à essuyer la vague de chaleur avec un minimum de victimes, comme elle l'a déjà fait dans des conditions presque comparables au sortir de chaque âge glaciaire, avant l'essor de la civilisation humaine[9]. Mais cette fois-ci le terrain est miné, truffé d'obstacles : en tentant de progresser vers les pôles, les biotopes se heurtent à des grillages et à des cultures, à des routes et à des zones urbaines, de sorte que dans nombre de cas, leur progression sera bloquée. Même les réserves animalières et les parcs nationaux constituent des pièges face au réchauffement climatique.

De même, les îles deviendront aussi des pièges. C'est le cas de Madagascar dont l'arbre emblématique, le baobab, est en danger de mort. Plusieurs espèces sont en effet menacées d'extinction, car leur habitat est doublement agressé par les activités humaines et par le changement climatique (voir encadré).

Sur les continents, le problème qui rend le réchauffement climatique si nocif est la fragmentation de l'habitat. Les

www.frenchpdf.com

deux facteurs de stress s'additionnent : une fois un habitat isolé des autres, avec une superficie par conséquent réduite et déjà insuffisante pour la plupart de ses espèces animales, le réchauffement climatique ajoute une agression supplémentaire à laquelle ces espèces en souffrance ne peuvent plus faire face, car elles ne peuvent pas migrer vers le pôle hors de leur enclos naturel. D'où l'importance, que l'on soulignera dans le dernier chapitre sur les solutions à la crise, de préserver des « corridors écologiques » entre les habitats devenus mosaïques, afin de faciliter les migrations, qu'elles visent à trouver de la nourriture, des partenaires sexuels, ou à suivre l'inexorable déplacement des enveloppes climatiques vers les pôles.

Les habitats désormais fragmentés et encerclés de frontières imposées par l'homme sont particulièrement vulnérables en plaine, car on a vu que c'est là où les isothermes – et donc l'enveloppe climatique des espèces – se déplacent sur les plus grandes distances chaque année. À l'inverse, les milieux montagnards sont relativement épargnés, et cela pour deux raisons.

La première, on l'a vu, c'est qu'un relief permet aux espèces de compenser le réchauffement climatique en grimpant vers l'amont, un degré Celsius de refroidissement étant obtenu en parcourant cent fois moins de distance qu'en migrant dans la plaine vers le pôle. Les oiseaux ne s'y trompent pas : une étude de 40 espèces de passereaux dans l'ouest des États-Unis montre qu'ils ont migré en altitude plutôt que vers le nord.

Le second avantage du milieu montagnard, c'est qu'il est plus difficile d'accès : les forêts de montagne sont moins intensément exploitées que les forêts de plaine et bien moins fragmentées, ce qui préserve des habitats spacieux.

D'une certaine façon, les biotopes montagnards, forestiers ou autres, constituent des réserves naturelles pour le repli des espèces, face au réchauffement climatique. Bien sûr, cela mène à une concurrence accrue entre habitants de longue date et nouveaux venus, doublée d'une diminution de la surface à mesure que montent les isothermes et les espèces, mais ces refuges en altitude constituent en quelque sorte l'assurance-vie de la biosphère, face aux changements climatiques.

À d'autres époques, avant le règne de l'homme, il a dû en être de même, par exemple lors des périodes de réchauffement – les interglaciaires – séparant les longs intervalles glaciaires : mammouths, bisons et autres grands cerfs acclimatés au froid ont migré vers le nord, mais aussi en altitude dans les massifs européens, asiatiques et nord-américains. Lors du dernier interglaciaire, hélas, les hommes les ont traqués jusque dans leurs refuges, exterminant une mégafaune repliée dans des culs-de-sac.

Aujourd'hui, nos reliefs servent également de refuges, dans la limite bien sûr de leur capacité d'accueil, et à condition que le réchauffement climatique ne s'emballe pas au point de faire dépérir, en haut de leurs forteresses, tous les réfugiés qui ne pourront pas monter plus haut.

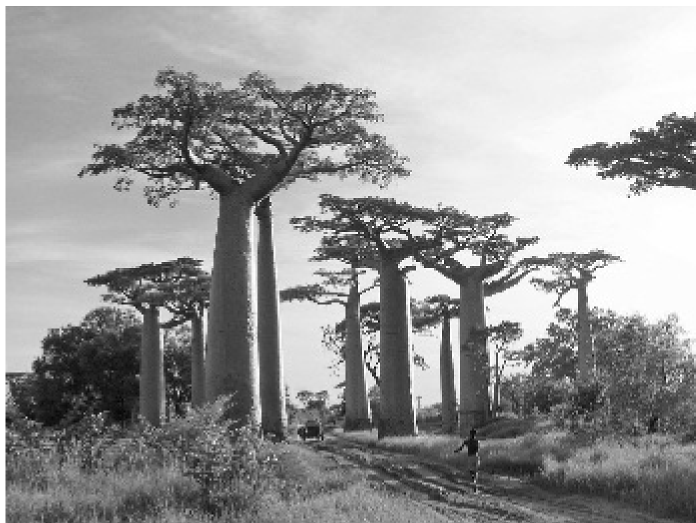
Dans le récit biblique de l'arche de Noé, lorsque le déluge prend fin, l'arche s'échoue en haut d'une montagne, d'où les animaux descendent pour recoloniser la Terre. Le parallèle s'impose avec la situation actuelle : lorsque les hommes en auront terminé avec leur bouleversement du climat et de la biosphère, c'est depuis les montagnes et leurs « arches de survie » que nombre d'espèces descendront repeupler la planète.

Le baobab en danger

Sur les neuf espèces de baobabs qui existent à travers le monde, sept se rencontrent à Madagascar, dont six sont endémiques à l'île et ne poussent donc nulle part ailleurs. Une autre espèce se rencontre en Australie et deux en Afrique : l'une est la plus connue du continent africain, la seconde n'y fut découverte qu'en 2012 dans les hautes montagnes de Tanzanie – ce qui montre au passage qu'on peut être une grosse espèce et tarder à être découverte et cataloguée.

Les baobabs sont des symboles de solidité et de longévité : leur tronc peut atteindre 10 mètres de diamètre et leur âge plusieurs millénaires. Leurs feuilles et leurs fruits sont comestibles et riches en vitamines et en calcium. Ce sont également de gros réservoirs d'eau : dans les cavités de son bois, un arbre peut en stocker jusqu'à 100 000 litres.

www.frenchpdf.com



À Madagascar, la plus grande et la plus célèbre espèce de baobab, *Andansonia grandidieri*, a rejoint en 2006 la liste des espèces en danger : plus que son exploitation directe, pour ses fibres et ses fruits, c'est la transformation de son aire d'occupation en terrains agricoles qui menace sa survie. (© Bernard Gagnon/Wikimedia [CC BY-SA 3.0].)

À Madagascar, les baobabs sont malheureusement sur le déclin, leur habitat étant détruit à la fois par l'expansion urbaine et par le réchauffement climatique. Ghislain Vieilledent, Cyrille Cornu et leurs équipiers du CIRAD ont recensé trois espèces en danger actuel d'extinction (*Adansonia grandidieri*, *Adansonia perrieri* et *Adansonia suarezensis*) en utilisant des images satellite, ainsi que des modèles informatiques pour prévoir le changement climatique sur l'île dans les décennies à venir et son impact sur les arbres.

Si la première espèce, qui compte un grand nombre de plants sur une grande surface, ne semble pas menacée par le changement, les deux autres devraient voir leur enveloppe climatique se réduire considérablement, notamment à cause d'une sécheresse appelée à croître dans leur zone d'occupation. L'espèce *Adansonia perrieri*, qui ne compte que 99 arbres, devrait voir son habitat chuter de 21 000 kilomètres carrés aujourd'hui à 6 500 kilomètres carrés en 2080 ; et *Adansonia suarezensis*, qui compte 15 000 arbres actuellement, verrait sa propre enveloppe spatiale chuter de 1 200 kilomètres carrés à 17 kilomètres carrés, le risque d'extinction pour les deux espèces devenant alors critique.

Leur survie passera par un reboisement hors de leurs zones actuelles, sur des sites plus frais, afin de prendre de vitesse la vague du réchauffement climatique. Hormis leur importance esthétique et emblématique, la grande chance des baobabs est qu'ils devraient recevoir ce soutien du fait de leur importance économique. Toutes espèces confondues, graines de baobab et poudres de fruits séchés – très appréciés comme gélifiants et aromatisants – représentent en effet une valeur marchande estimée à *un milliard* de dollars/euros par an.

Vers des scénarios catastrophes

Nous n'avons évoqué pour l'instant que les dégâts à venir imputables au réchauffement climatique « moyen » sur l'ensemble de la planète. Mais le propre du réchauffement que nous avons initié, c'est qu'il déclenche des phénomènes locaux et régionaux exceptionnels et souvent imprévisibles. Un exemple particulièrement inquiétant nous est fourni par le vacillement, au bord de l'implosion, de la forêt amazonienne.

On a déjà vu combien l'habitat s'est étriqué en Amazonie sous le coup de la déforestation. Mais le changement climatique s'y est ajouté, et ce nouveau facteur joue de deux façons : en aggravant la menace pour les espèces déjà mal en point, et en affectant d'autres biotopes jusque-là épargnés, ce qui allonge la liste des victimes.

Ce second cas de figure est déjà observé chez les oiseaux. La majeure partie de la déforestation avait affecté jusqu'ici le bassin amazonien, les versants montagneux ayant échappé à la coupe (dans les forêts côtières de l'État de Rio de Janeiro, par exemple, il ne reste que 20 % de la forêt de basse altitude, sous la cote des 200 mètres, alors que 90 % de la forêt demeure au-dessus de 1 300 mètres d'altitude). Si aux basses altitudes, nombre d'oiseaux sont donc déjà condamnés par la destruction de leur habitat, le réchauffement climatique va désormais affecter les espèces sur les reliefs. Celles-ci auront sans doute la possibilité de migrer en amont, mais elles souffriront en contrepartie d'une nette réduction de surface.

Il y a toutefois bien pire, et on touche ici aux risques proprement apocalyptiques du réchauffement climatique. Les arbres ont la faculté d'intercepter l'humidité de l'air qui circule au-dessus d'une région, puis de la relâcher (ce qu'on appelle l'évapotranspiration) jusqu'à déclencher la pluie : végétation et pluviométrie se renforcent donc

www.frenchpdf.com

mutuellement. Or, dans une étude publiée en 2013, Leydimere Oliviera de l'université de Viçosa et ses collègues brésiliens ont démontré sur la foi de modèles climatiques que plus la forêt amazonienne est abattue, plus les précipitations diminuent, avec d'ailleurs un effet direct sur l'économie agricole, les cultures devenant moins rentables que les forêts qu'elles étaient censées remplacer.

Le phénomène risque de tourner au désastre. Durant l'été 2005, l'Amazonie a essuyé la pire sécheresse de son histoire (on a compté 73 000 foyers de feux de forêt) et le phénomène fut à deux doigts de se répéter en 2006. Or sur la foi de démonstrations sur le terrain, en soumettant plusieurs parcelles de forêt à une sécheresse artificielle, Dan Nepstad, Paulo Brando et leurs collaborateurs de l'Institut amazonien pour la recherche environnementale ont démontré qu'il suffirait de trois années consécutives de sécheresse pour que la majorité de la forêt dépérisse.

On s'était rassuré en qualifiant la sécheresse de 2005 de « sécheresse du siècle », peu apte à se répéter. Or en 2010, rebelote : les dégâts auraient même dépassé ceux de 2005.

Rien qu'à ce stade, la mort subite de tant d'arbres a des conséquences manifestes. Alors qu'en temps normal la forêt amazonienne retire de l'atmosphère (en le fixant par photosynthèse) près de 2 milliards de tonnes de dioxyde de carbone par an – ralentissant ainsi le réchauffement climatique –, c'est l'effet inverse qui fut observé en 2005 et en 2010 : au lieu d'absorber du gaz carbonique, l'Amazonie en a relâché respectivement 4 et 6 milliards de tonnes dans l'atmosphère au travers des feux de forêt, soit un bilan négatif de 6 et 8 milliards de tonnes pour ces deux années, l'équivalent à chaque fois d'environ 20 % de nos émanations industrielles et agricoles mondiales, ou, si l'on préfère, la totalité des émanations de la Chine et de la Russie combinées.

Le danger est donc palpable et les perspectives redoutables. Si les sécheresses estivales se répètent et que la mortalité des arbres redouble, la déchéance de la forêt amazonienne peut atteindre un point de non-retour avec des effets en boucle, la disparition de la canopée appelant la sécheresse et la sécheresse accentuant la disparition de la canopée. Toute la région deviendra en l'espace de quelques années une savane ouverte, voire un désert, avec des répercussions évidemment catastrophiques sur l'économie des pays concernés, mais aussi sur le climat mondial et même sur la composition de l'atmosphère : 20 % de notre oxygène est actuellement fabriqué par photosynthèse par la forêt amazonienne.

Il resterait heureusement le plancton océanique qui assure, dans l'anonymat le plus complet, 50 % de la production d'oxygène mondiale. Mais ce plancton, justement, est-il lui-même à l'abri d'une catastrophe ? Au contraire, il apparaît que microflore et microfaune des océans sont directement visées par le réchauffement climatique.

Le dépérissement des océans

Jusqu'à présent, nous avons peu parlé des océans, parce que leur exploitation par l'homme a un train de retard sur celle des continents, et aussi parce que les espèces sont plus difficiles à suivre et à recenser. On en est encore à la destruction de populations, plutôt qu'à l'extinction de beaucoup d'espèces, mais cette chute des effectifs les rend vulnérables à tout autre facteur négatif qui viendrait s'y greffer.

Or, plus que tout autre milieu, l'océan est à la merci du réchauffement climatique, car c'est une véritable éponge, et à deux titres : il absorbe l'excédent de chaleur qui s'accumule dans l'atmosphère, et il absorbe aussi directement le dioxyde de carbone.

Le premier effet tampon – l'absorption des calories – a servi d'ailleurs à ralentir le réchauffement de l'atmosphère. Des voix climato-sceptiques s'étaient élevées au milieu des années 2000 pour constater un ralentissement de la hausse des températures atmosphériques et la brandir comme preuve que le réchauffement climatique était temporaire ou exagéré. Or il ne s'agirait, du moins en partie, que d'une variation dans le partage du réchauffement entre atmosphère et océans ces années-là, l'eau marine ayant absorbé plus de calories que de coutume[10].

De fait, l'océan absorbe 93 % de la chaleur produite par notre effet de serre anthropique, de petites variations dans cette absorption – dues notamment aux courants marins – se traduisant par des variations résultantes du réchauffement atmosphérique. Ce réchauffement des airs, sur lequel nous nous focalisons, n'est donc que la partie visible de l'iceberg (ou devrait-on plutôt dire, la pointe du brûlot !) du réchauffement climatique. On peut même dire qu'il ne constitue que 1 % du réchauffement total, puisque en sus des 93 % absorbés par le réchauffement des océans, 3 % des calories sont réquisitionnées pour la fonte des banquises et glaciers, et 3 % servent au réchauffement de la terre ferme.

Malgré cette part du lion dans l'absorption des calories, l'augmentation moyenne de la température des océans en un siècle est à peine supérieure à 1 °C, bien que les eaux marines aient absorbé 100 fois plus de calories que l'atmosphère. Cela s'explique par le fait que les océans constituent une masse beaucoup plus grande à chauffer (à peu près 100 fois plus que l'atmosphère, justement).

L'une des manifestations les plus visibles du réchauffement océanique est la dilatation thermique des eaux. Ce gonflement se traduit par une hausse du niveau des mers de l'ordre d'un millimètre par an. Deux millimètres supplémentaires de hausse annuelle sont apportés par le déversement de l'eau de fonte des glaciers dans les

www.frenchpdf.com

océans. Cela peut paraître minime, si le rythme reste inchangé : environ 30 centimètres de hausse en un siècle. Selon que l'on réduise ou non nos émissions de gaz à effet de serre, cette montée du niveau marin pourrait toutefois atteindre 80 centimètres au XXI e siècle, selon les estimations du GIEC, avec des conséquences dramatiques pour les pays en voie de développement qui sont déjà à fleur d'eau, comme le Bangladesh par exemple11.

Pour la biosphère marine, le problème le plus immédiat est la hausse de la température en elle-même. Pour les espèces mobiles, comme le plancton et les poissons, on pourrait penser qu'il leur suffit de migrer vers les hautes latitudes ou vers le fond pour trouver de l'eau plus fraîche. Si cette adaptation est possible pour certaines espèces (et temporaire, car la température des eaux profondes augmente aussi, quoique plus lentement que les eaux de surface), elle ne l'est pas pour toutes, de nombreuses espèces ayant besoin non seulement d'une température idéale, mais aussi d'autres paramètres – salinité, texture du fond marin, nourriture particulière – qui n'accompagnent pas nécessairement les décalages de températures.

Le problème est encore plus grave pour les espèces fixées au fond qui, tels les arbres sur les continents, migrent beaucoup plus lentement ou sont même « assignées à résidence ». C'est le cas notamment du corail.

Le corail, dont il existe plus de 2 000 espèces à travers le monde, est l'association d'un polype – de la famille des cnidaires, à l'instar de la méduse et de l'anémone – et d'une algue qui vit en symbiose avec lui et lui fournit nourriture et énergie. Ces algues unicellulaires, appelées xanthelles, pratiquent la photosynthèse – c'est pour cela que le corail a besoin de rester près de la surface pour avoir assez de lumière – et rejettent du dioxyde de carbone dont profitent les polypes pour fabriquer leur carapace protectrice de calcaire.

Ainsi construits, les récifs coralliens servent d'habitat à des communautés entières d'animaux marins – éponges, mollusques, crustacés et poissons – au point que l'on estime qu'ils abritent le quart de toutes les espèces marines : une richesse faunique comparable à celle des forêts vierges sur la terre ferme.

Le revers de la médaille, c'est qu'à l'instar des forêts tropicales, les récifs coralliens sont fragiles et très sensibles à l'impact de l'homme. Ils sont déjà agressés par la surexploitation – pêche excessive, ancres traînantes de bateaux peu regardants, constructions anarchiques en bord de mer, eaux polluées et troubles interférant avec la photosynthèse – mais voilà qu'à ces facteurs de stress vient s'ajouter le réchauffement climatique.

Les coraux prospèrent dans des fourchettes de températures assez étroites : idéalement autour de 26-27 °C, ce qui explique qu'ils se cantonnent pour la plupart dans les zones équatoriales et tropicales, entre 30 degrés de latitude nord et sud. Certaines espèces parmi les moins répandues vivent en eau plus froide, notamment en Méditerranée ; d'autres se sont adaptées aux eaux lagunaires plus chaudes à l'arrière des récifs ; mais pour l'essentiel ils détestent les brusques hausses de température – un degré Celsius durant plusieurs mois leur est insupportable – auxquelles ils répondent par un dépérissement spectaculaire que l'on appelle le blanchiment du corail. Cette perte de pigmentation traduit entre autres l'expulsion des algues symbiotiques hors du réseau corallien.

Le problème fut observé pour la première fois dans les Antilles en 1979, mais c'est surtout l'été 1998 – premier « grand cru » du réchauffement climatique – qui a vu dépérir 16 % du corail mondial. Depuis, les crises se répètent et s'intensifient, avec notamment un nouvel épisode dévastateur en 2010, de sorte que l'on estime qu'aujourd'hui 60 % du corail mondial est menacé de destruction sous la double agression des activités humaines directes et du réchauffement climatique. Les projections sont pessimistes : 90 % des coraux seraient menacés d'ici 2030, et la totalité en 2050, si les tendances ne sont pas inversées.

Et qui dit destruction des populations, dit évidemment menace de disparition des espèces. Alors qu'en 1998, sur les quelque 700 espèces de corail étudiées, une seule semblait en danger, un nouvel état des lieux dix ans plus tard, en 2008, fait bondir d'un coup d'un seul le bilan à 235 espèces menacées. Et comme si les premières sources de stress ne suffisaient pas, le corail et l'ensemble du monde marin sont désormais frappés par un fléau supplémentaire : l'acidification des océans.

Dans l'atmosphère, le dioxyde de carbone entretient l'effet de serre et augmente la température de l'air, et donc de l'eau. Mais il y a une fraction non négligeable du gaz – près d'un tiers – qui se dissout dans les océans. C'est autant qui ne participe pas au réchauffement climatique, mais le revers de la médaille, c'est que ce gaz carbonique dissous se transforme en acide carbonique (H_2CO_3), ce qui fait croître l'acidité des eaux marines.

Au départ, l'eau océanique n'est pas neutre. Elle est même légèrement basique – on dit aussi « alcaline » – avec un pH normalement supérieur à 8 : précisément 8,2 avant l'ère industrielle. Ce pH ou « potentiel hydrogène » exprime le degré d'acidité ou au contraire de basicité d'une solution : une eau neutre a un pH de 7 ; une eau basique un pH supérieur à 7 ; et une eau acide un pH inférieur à 7. L'échelle est logarithmique, c'est-à-dire qu'une unité de pH en plus ou en moins correspond à une baisse ou à une hausse d'acidité d'un facteur dix.

Or, depuis le début de l'ère industrielle il y a deux siècles, la dissolution du dioxyde de carbone dans l'océan et sa transformation en acide carbonique a déjà fait baisser le pH de 0,1 (on en est à 8,1 aujourd'hui), ce qui correspond à une acidité en hausse de 25 %. L'eau marine n'est pas encore acide au sens propre (il faudrait pour cela que son pH tombe sous la barre des « 7 »), mais elle est relativement plus acide qu'auparavant. Les géologues estiment

www.frenchpdf.com

même qu'elle n'a jamais été aussi acide depuis plus de 20 millions d'années.

Avec nos rejets croissants de dioxyde de carbone, cette hausse d'acidité s'accélère : le pH marin aurait perdu 0,026 point entre 1991 et 2006, c'est-à-dire qu'à ce rythme on connaîtra une nouvelle chute de 0,1 point d'ici 2066 (le pH vaudra alors 8), et certaines estimations parlent d'un pH marin qui tomberait même à 7,8 avant la fin du siècle, soit une augmentation totale de l'acidité océanique depuis le début de l'ère industrielle de l'ordre de 150 % : elle aura plus que doublé.

Et alors ? Un pH de 7,8, c'est celui des eaux minérales parmi les plus basiques du commerce : la plupart sont 10 fois plus acides. Pourquoi en faire tout un plat ?

Posez donc la question au corail, aux coquillages et au plancton. Ces organismes fabriquent leurs exosquelettes et coquilles calcaires à partir du calcium et des ions carbonates dissous dans l'eau de mer. Si l'acidité marine augmente un tant soit peu, les ions carbonates deviennent de plus en plus rares (ils se combinent avec des protons pour former des bicarbonates impossibles à utiliser), privant les organismes marins de matière première. Pis : les carbonates des coquilles et squelettes déjà formés commencent à se dissoudre, tuant ou rendant vulnérables les organismes existants.

On en est déjà là : la Grande Barrière de corail d'Australie montre une décalcification générale de 14 % depuis 1990. Dans une étude conduite sur les élevages ostréicoles de l'Oregon, l'acidité accrue se traduit par une mortalité massive des larves d'huître qui n'arrivent pas à bâtir leurs premières coquilles.

Le plancton ne se porte guère mieux. Une étude dirigée en Méditerranée par K. J. Sebastian Meier, à l'université d'Aix-Marseille à l'époque, a montré un amincissement continu et inquiétant des coquilles de plancton utilisant du carbonate – des coccolithophores – mesuré sur des échantillons couvrant la période de 1993 à 2005. Pareillement dans l'océan Antarctique, l'équipe australienne d'Andrew Moy a montré que les coquilles d'un autre groupe de plancton – les foraminifères – sont 30 % plus légères que de par le passé.

Toutes les espèces de plancton ne seront pas similairement affectées, notamment celles qui préfèrent la silice au carbonate pour bâtir leurs coquilles, mais s'il y avait disparition de la majorité d'entre elles, affectant toute la chaîne alimentaire des océans, les dégâts pour l'écosystème seraient considérables.

Un rapport des Nations unies estime que cet effondrement en dominos de l'écosystème, affectant principalement la pêche, pourrait représenter 3 000 milliards de dollars/euros par an de manque à gagner pour l'économie mondiale, sans compter les famines et les bouleversements sociaux qui en résulteraient. Et s'il faut un électrochoc pour faire bouger les lignes et persuader instances et gouvernements qu'il est grand temps de combattre le réchauffement climatique et l'effondrement de la biosphère, c'est bien cet impact sur l'économie qui a les plus grandes chances de motiver les troupes.

1.

J'utilise par commodité l'ancienne unité de mesure de pression, le bar, qui est équivalent à la pression d'une atmosphère terrestre. L'unité moderne est le pascal (Pa) où 1 bar = 100 000 Pa.

2.

Pour les petites proportions on n'utilise pas le « pour-cent », trop grossier, mais le ppm ou « partie par million ». Un pour-cent = 10 000 ppm. Donc 280 ppm = 0,028 %.

3.

Cette modulation du climat terrestre par la biosphère a été érigée en hypothèse « biogéochimique » par l'écologue anglais James Lovelock à partir de 1970, qui lui a donné le nom de Gaïa, déesse mère de la mythologie grecque.

4.

Anthropique signifie « relatif à l'homme ».

5.

Lire à ce sujet, de Sylvestre Huet, *L'Imposteur, c'est lui : réponse à Claude Allègre*, Paris, Stock, 2011 ainsi que « Les chevaliers de l'ordre de la Terre plate », www.realclimate.org/index.php/archives/2007/11/les-chevaliers-de-lordre-de-la-terre-plate-part-i-allgre-and-courtillot/.

6.

Cela correspond à environ 10 milliards de tonnes de carbone pur (« équivalent carbone ») en soustrayant la masse de l'oxygène dans la molécule, cette unité rectifiée permettant de comparer et d'additionner le carbone émis dans

www.frenchpdf.com

des molécules différentes.

7.

Joseph Grinnell (1877-1939) fut l'un des premiers zoologistes à s'intéresser aux communautés écologiques : il développa notamment le concept de « niche écologique ».

8.

D'autre part, le réchauffement planétaire d'environ 0,6 °C en un siècle concerne la température *moyenne*. Températures maximales et minimales ont varié différemment, les températures minimales d'un lieu ayant souvent augmenté davantage que ses températures maximales.

9.

À la différence que lors des transitions climatiques passées, on partait d'une température plus basse pour remonter de 4 à 5 °C. Dans le cas actuel, on est déjà dans la partie chaude du cycle – l'interglaciaire – et on lui ajoute 2 à 4 °C supplémentaires (scénario moyen de réchauffement aux XX[e] et XXI[e] siècles), ce qui est hors normes.

10.

Durant cette période, il y a également eu des changements dans les instruments de mesure utilisés, le passage à des données calibrées différemment donnant l'illusion d'une inflexion dans la courbe du réchauffement.

11.

Nous ne sommes pas à l'abri d'un emballement catastrophique de la fonte des glaciers du Groenland et de l'Antarctique, qui se traduirait par une hausse de plusieurs mètres. Scénario catastrophe, mais qui reste possible tant les facteurs de renforcement du réchauffement climatique peuvent être complexes.

www.frenchpdf.com

8

Comment freiner les extinctions

Que l'on soit dans une phase accélérée des extinctions animales et végétales sur Terre, au-dessus de la moyenne des temps géologiques, est une évidence. Même si l'on arrêtait le massacre maintenant, ce qui est fait est fait, et le bilan est déjà lourd pour de nombreuses classes du monde vivant. Rien que l'extinction de la mégafaune au sortir du dernier âge glaciaire marque le début de l'ingérence néfaste de l'homme dans l'écosystème, et avec le recul du temps ressortira du « bruit de fond » de l'évolution comme un premier événement majeur.

Environ 10 000 ans plus tard, la seconde vague d'extinctions à travers les îles du Pacifique, due à leur colonisation par les Polynésiens, puis par les Occidentaux, ressortira également du bruit de fond, puisque nous avons vu que 10 % des espèces d'oiseaux ont probablement été exterminées au cours du dernier millénaire.

Enfin, la troisième vague d'extinctions, qui a démarré depuis deux siècles avec l'ère industrielle, l'agriculture intensive et l'expansion effrénée de la population humaine, est en cours et son ampleur finale reste à mesurer. Son niveau de sévérité dépendra des efforts déployés par notre civilisation pour la contenir, efforts qui dépendent de la génération actuelle et de celles à venir, et dont le dénouement se jouera essentiellement au XXI e siècle.

Des scénarios de croissance économique, de préservation de la biosphère et de freinage du réchauffement climatique dépendra l'ampleur finale de cette extinction en trois temps. Atteindra-t-elle le seuil « géologique » d'une grande extinction de masse, comme celle de la fin des dinosaures, avec près de 75 % d'espèces exterminées ?

Les cyniques diront : et alors ? Tant qu'il nous reste quelques espèces rentables pour les étals des supermarchés et la décoration de nos jardins, où est le drame ? À quoi nous sert le reste de la biosphère ?

D'autres prêchent un défaitisme empreint d'un grand respect pour les hiérarchies en place et laissent entendre, comme un ancien ministre de l'Éducation et de la Recherche, que de toute façon le simple citoyen n'y peut rien et doit s'en remettre à la sagesse des gouvernements, lesquels sont seuls habilités à s'attaquer au problème. Et encore : comme certains ne jouent pas le jeu, se dresser contre l'ordre des choses est vain.

Heureusement, la situation peut être redressée, et à tous les niveaux. Grâce au travail des chercheurs et à leur collaboration au sein d'instances fédératrices comme l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN), il y a prise de conscience de l'ampleur et de la vitesse des extinctions, et de certains des facteurs qui exacerbent le problème, comme le réchauffement climatique.

Face à cette dernière menace, notamment, et parce que les conséquences économiques sont palpables – sécheresses et inondations ayant un coût – les États se sont mobilisés, et sur la base de travaux intergouvernementaux, au sein du GIEC notamment, des caps de nuisance inacceptable sont définis et des décisions sont prises pour ne pas les dépasser. À force de concessions et de compromis, d'amendes et de crédits d'impôt, les États et leurs industries tentent d'implanter un tableau de marche pour le XXI e siècle, qui limiterait le réchauffement supplémentaire à 2 °C par rapport à la fin du siècle dernier, comme l'ont rappelé en décembre 2015 les représentants de 195 pays lors de la COP 21.

Cela passe par une réduction des émanations industrielles et agricoles de dioxyde de carbone, à commencer par un ralentissement de leur courbe de croissance, leur plafonnement, puis leur réduction progressive. Même le citoyen participe directement à cet effort, en modifiant ses comportements de consommation : rouler moins vite et avec plus de souplesse, consommer des produits locaux plutôt qu'acheminés depuis de grandes distances, mieux isoler son habitation.

Cela, c'est la stratégie qui vise à freiner le réchauffement climatique, qui montre que l'humanité peut se mobiliser pour préserver ses intérêts, en l'occurrence sa survie économique et sociale. La préservation des espèces vivantes est un autre combat, mais qui partage de nombreuses problématiques, stratégies et solutions possibles avec celui mené pour la sauvegarde du climat.

Le fond du problème

Le fond du problème est en effet commun au réchauffement climatique et à l'extinction des espèces : c'est notre mode de vie, à savoir la consommation d'énergie et de matières premières qu'appelle une population toujours croissante et dont les revendications matérielles sont elles aussi toujours en hausse.

Fort longtemps, cette expansion de la population et de ses besoins n'a pas rencontré d'obstacles majeurs ou de

www.frenchpdf.com

limites, les ressources de la Terre semblant infinies. Épidémies et guerres ont rythmé de surcroît la croissance de la population, servant de modérateurs. Les progrès de la médecine au XX e siècle et la stabilité des grands États industriels au lendemain de la Seconde Guerre mondiale, avec le boom économique qui en a découlé, ont fait poindre les limites du système. Ils ont exposé sa faille principale, à savoir que la croissance ne s'effectue pas dans un cadre ouvert et infini, mais sur une planète « fermée » aux ressources finies. De cette prise de conscience a surgi le concept de développement durable qui prêche le renouvellement des ressources utilisées, plutôt que leur épuisement sans retour, mais toujours dans une logique productiviste.

Plus radicale, la notion de décroissance remet en question les fondements mêmes de la civilisation moderne, à savoir la recherche du confort maximal à travers le travail. Elle souligne la non-prise en compte dans les modèles économiques de l'épuisement des stocks, et l'évaluation quantitative plutôt que qualitative du bonheur des hommes. Plus encore que le développement durable, elle appelle une sobriété de la consommation, répondant uniquement à des besoins vitaux, et prévoit de toute façon que la décroissance est inéluctable et que plus vite on l'adoptera, mieux on se portera, notamment en réduisant « l'empreinte écologique » des activités humaines.

Qu'il s'agisse de décroissance ou de développement durable, un premier champ d'action concerne l'énergie. Les stocks de carburants fossiles – charbon, pétrole et gaz naturel – sont appelés à s'épuiser et sont fort polluants en dioxyde de carbone, alors que d'autres sources d'énergie présentent une alternative aussi inépuisable que peu polluante : les énergies dites renouvelables.

Celles-ci ne sont pas magiques : elles dépendent en fait d'une centrale de fusion nucléaire qu'on appelle le Soleil, Soleil qui a des réserves d'hydrogène à brûler pour encore quatre à cinq milliards d'années et donc, en ce qui nous concerne, s'apparente à une source d'énergie inépuisable et quasi gratuite. Les énergies dites renouvelables (hormis la géothermie) sont les formes d'interception sur Terre de ce flot continu d'énergie : sa transformation directe en électricité par des panneaux photovoltaïques ou en chaleur par des panneaux solaires thermiques ; et sa transformation indirecte en électricité à travers les effets météorologiques que l'insolation induit dans notre environnement. Ainsi, l'énergie éolienne soustraite des vents, et l'énergie hydroélectrique qui découle de l'évaporation des mers et des pluies qui alimentent nos cours d'eau ont pour source le Soleil.

Déjà, le développement durable et le recours de plus en plus important aux énergies renouvelables vont changer la donne pour la biosphère terrestre. Ils œuvrent pour un ralentissement de la pollution et du réchauffement climatique, bien qu'il s'agisse pour l'instant d'un ralentissement de leur croissance et pas encore de leur plafonnement ou de leur décroissance, du moins au cours des prochaines décennies. Or le sort d'un très grand nombre d'espèces – leur extinction ou leur survie – se joue justement au cours des prochaines décennies, et leurs cas ne peuvent pas attendre. En outre, si la pollution et le réchauffement climatique sont des facteurs aggravants qui pèsent sur leur condition, les problèmes de base qui agressent les espèces, comme on le sait, sont leur surexploitation directe – consommation alimentaire en tête – et la destruction de leur habitat.

Les premières mesures directes à prendre pour tenter de sauver les espèces menacées consistent donc à contrôler de façon très stricte leur exploitation – quota de chasse et de pêche, tailles minima des captures, poursuite des braconniers – et à préserver les habitats, notamment au travers de parcs et autres réserves naturelles ou artificielles.

Pour ce qui est de la chasse et de la pêche excessives, le bon sens voudrait que leurs pratiquants limitent d'eux-mêmes leurs captures, sous le contrôle d'autorités régulatrices. De telles mesures ont souvent été trop tardives par le passé : on l'a vu dans le cas de la pêche à la morue. Et même si l'espèce ne s'est pas éteinte, la diminution drastique des stocks la place à la merci de tout autre facteur néfaste qui viendrait l'inquiéter.

En 2015, après la morue, c'est ainsi au tour du bar de connaître un effondrement des stocks dans les eaux françaises : pêcheur amateur sur les côtes bretonnes, j'ai assisté avec mes « compagnons de ligne » à la baisse alarmante de ce loup de mer au cours des dix dernières années, et les autorités viennent de réagir en augmentant la taille autorisée des prises, puis en décrétant des embargos temporaires sur sa pêche, notamment en période de reproduction.

Plusieurs espèces de thon sont pareillement menacées, la pression étant ici exercée par un marché haut de gamme, celui des nantis (notamment l'effet « sushi »), avec l'effet pervers que plus le poisson devient rare, plus son prix de vente augmente, et donc plus il est traqué.

Le problème est encore plus aigu lorsque ce sont des populations pauvres qui sont tenaillées par la faim : difficile dans ce cas de raisonner et de penser à l'avenir ; seul le présent compte. C'est ainsi que des espèces rares, autrefois épargnées, ont rejoint la liste du gibier de subsistance, comme les lémuriens dans l'île de Madagascar, et nombre de singes ailleurs.

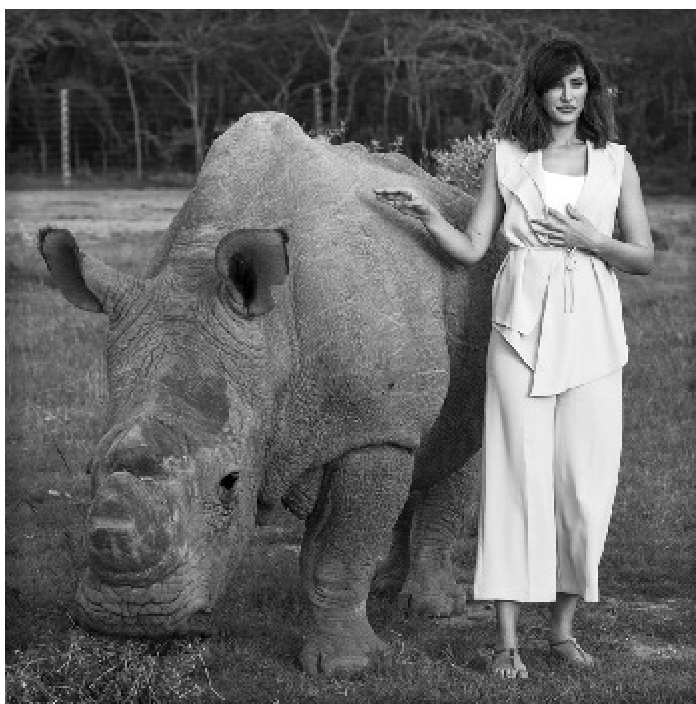
Dans de tels cas, les solutions ne sont pas simples, d'autant que nombre de pays comptant une grande proportion d'espèces menacées sont en proie à des effondrements de leur système politique, entraînant ceux de leurs instances régulatrices. Une aide internationale massive de la part des pays riches est l'une des seules solutions envisageables, doublée des efforts et du savoir-faire des organisations non gouvernementales, notamment pour l'éducation des populations. Dans une lettre ouverte publiée en 2010, Julia Marton-Lefèvre, alors directrice générale

www.frenchpdf.com

de l’UICN, exhorte ainsi les 30 pays membres de l’OCDE (Organisation de coopération et de développement économiques) à consacrer, en sus de 0,5 % de leur PIB alloué à l’assistance économique aux pays en voie de développement, 0,2 % supplémentaire à la conservation de la biodiversité dans ces mêmes pays.

L’éducation des populations concernées ne consiste pas bien sûr en discours théoriques ou moralisants, mais en l’apprentissage de comment exploiter les espèces sans que leurs stocks ne s’effondrent, voire comment en tirer profit sans les consommer : ainsi les lémuriens de Madagascar constituent une attraction touristique précieuse et leur mise en valeur, plutôt que leur destruction, est une poule aux œufs d’or. Encore faut-il que les principaux concernés – les Malgaches qui vivent en contact avec eux et qui peuvent être tentés par la capture d’un animal ou l’abattage d’un arbre – profitent directement de cette manne touristique, plutôt que des intermédiaires ou une caste de privilégiés.

La lutte contre les grands braconniers est un autre problème pour lequel il est difficile de trouver des solutions. Au Kenya, où le massacre des éléphants et des rhinocéros a atteint un stade critique, la police a le droit de tirer à vue sur les délinquants, mais le braconnage est à peine freiné, tellement les profits l’emportent sur le risque. C’est sans doute plus en amont, au niveau de la clientèle des futurs trophées, que ce soient les marchands et acheteurs d’ivoire ou les fabricants de prétendus aphrodisiaques et médecines à base de cornes animales, qu’il faut éduquer, légiférer et sévir.



Nombre de personnalités du monde des arts et des lettres œuvrent pour la protection des espèces en danger. Ici l’actrice Nargis Fakhri pose avec le dernier rhinocéros mâle de la sous-espèce *Ceratotherium simum cottoni*, dans le parc Ol Pejeta (Kenya), lors d’une campagne pour lever des fonds en vue de sa protection. (© Make it Kenya/Stuart Price.)

En somme, l’environnement le plus critique pour une espèce animale en danger, comme le rhinocéros, est une population ou un habitat menacés, doublés d’une situation politique instable ou décadente qui empêche sa protection. Son salut vient alors, entre autres, d’un effort de dispersion de l’animal en question dans plusieurs pays contigus, afin de multiplier ses chances de bénéficier dans au moins l’un d’entre eux d’un environnement politique stable et favorable à sa conservation.

Dans une synthèse publiée en 2010 sur la situation des vertébrés dans le monde, Michael Hoffmann, directeur de recherche à l’IUCN, et ses quelque 173 coauteurs ont recensé combien d’espèces menacées se redressent grâce aux mesures prises pour les protéger, changeant positivement de catégorie sur la liste rouge au fil du temps, alors que dans la majorité des cas c’est surtout la tendance inverse que l’on observe, c’est-à-dire la détérioration du statut d’un animal ou d’une plante.

En ce qui concerne la chasse et le braconnage, l’étude montre que seules six espèces de mammifères affectées par ce problème ont vu leur situation s’améliorer, alors que 62 ont franchi dans l’autre sens un pas supplémentaire vers l’extinction malgré les efforts déployés, le bilan restant donc foncièrement négatif. Les mesures de protection ont plus de succès chez les oiseaux, puisque 9 améliorations de statut ont été enregistrées sur la liste rouge des

www.frenchpdf.com

espèces menacées, contre 31 détériorations dans le même intervalle de temps – un redressement partiel un peu plus encourageant.

La protection de l'habitat

Plus encore que la surexploitation directe des espèces, on a vu que la destruction de l'habitat est sans doute le problème le plus grave à l'origine de l'appauvrissement de la biosphère. Le remède principal consiste à établir des réserves et des zones protégées. En 2010, on en compte 133 000 sur la planète, couvrant plus de 25 millions de kilomètres carrés, soit 50 fois la superficie de la France : elles concernent 12 % des terres émergées, 6 % des eaux territoriales et 0,5 % des océans.

Si la fraction océanique sous protection reste faible, on ne peut que se réjouir des efforts consentis par les gouvernements à la fois le long des côtes et surtout sur la terre ferme, d'autant que la surface protégée est en progression constante. Ainsi peut-on se féliciter par exemple de l'établissement en 2006 du parc national de Juruena au Brésil, qui couvre près de 20 000 hectares de forêt amazonienne et de savane – plus de deux fois la superficie de la Corse.

C'est d'ailleurs un fait qu'en Amazonie les efforts consentis par le gouvernement brésilien ont non seulement freiné le taux de déforestation de façon très nette depuis 2005, mais ont aussi augmenté la superficie des zones protégées, qui dépasse aujourd'hui 1,7 million de kilomètres carrés, soit la moitié de la forêt amazonienne actuelle.

Malgré ces signes encourageants, de nombreux problèmes persistent : il ne faut pas seulement que la superficie d'une réserve paraisse adéquate, il faut aussi le plus souvent possible qu'elle soit d'un seul tenant (on a vu combien une population animale peut chuter si son habitat est fragmenté), qu'elle soit stratégiquement pensée, c'est-à-dire qu'elle recouvre bien l'habitat d'un grand nombre d'espèces menacées et qu'elle soit correctement gérée, car définir une zone protégée ne sert à rien si l'entretien et la surveillance ne sont pas assurés.

Il reste donc beaucoup de travail à faire, puisque selon l'étude de Michael Hoffmann et son armée de coauteurs, la progression du statut des vertébrés (leur changement de catégorie sur la liste rouge au fil du temps), face à ce problème identifié de destruction d'habitat, se déroule toujours de façon massive dans le mauvais sens : pour dix espèces qui avancent d'un cran vers l'extinction, il n'y en a qu'une qui progresse dans le bon sens vers la rédemption. En prenant les choses du bon côté, on peut toutefois avancer que la situation aurait été 10 % plus grave s'il n'y avait pas eu cet important effort de préservation des habitats.

C'est assez décourageant de constater un taux de réussite aussi réduit en regard des efforts déjà fournis, et cela doit constituer un électrochoc quant au travail qui reste à faire. Au rang des bonnes nouvelles, certaines classes d'animaux bénéficient de mesures plus efficaces que la moyenne, puisqu'une étude publiée en 2006 estime que les extinctions d'oiseaux auraient été 25 % supérieures sans les mesures de protection.

Au passage, il faut souligner cette subjectivité dans l'attention portée aux différents groupes du monde vivant – oiseaux et mammifères étant particulièrement choyés – alors que reptiles et insectes, par exemple, bénéficient de beaucoup moins d'égards. Il y a, dans nos efforts pour la protection de la biodiversité, du favoritisme, culturel ou émotionnel, ou bien, pour prendre le problème dans l'autre sens, un délit de faciès à l'encontre des espèces que l'on trouve moins esthétiques ou moins intéressantes.

Pour en revenir à la protection de l'habitat, outre les grands projets de réserves animales ou forestières, il y a quantité de mesures à prendre à l'échelon local et même personnel, moins spectaculaires mais tout aussi utiles, permettant au citoyen d'apporter sa contribution.

Il en est ainsi des plans locaux d'urbanisme (PLU) et des projets d'aménagement et de développement durable (PADD) qui donnent aux communes la tâche difficile à la fois de planifier l'expansion future de la population et de protéger les espaces verts, notamment en arrêtant la pénétration urbaine dans les zones agricoles. Très importante aussi est la notion de corridor écologique, c'est-à-dire la préservation des couloirs de circulation de plantes et d'animaux d'une zone à l'autre dans le contexte d'un habitat fragmenté. Autrefois, ce maillage était naturellement assuré par le bocage : des haies, talus et bosquets qui séparaient les parcelles agricoles. Le remembrement au XXe siècle – la destruction de ces « obstacles » pour permettre une agriculture plus efficace – a grandement nui à la biodiversité et à tous les avantages que celle-ci apportait justement et gratuitement à l'agriculture.

On en est aujourd'hui conscient : en France, le Grenelle de l'environnement a ainsi proposé en 2007 un nouveau type de remembrement écologique pour réparer les dégâts et réinstaurer une « trame verte ». Restructurer les corridors écologiques est aujourd'hui un plan d'action à encourager. À petite échelle, chaque citoyen disposant d'un jardin peut aussi œuvrer dans le bon sens en préservant des îlots de vie sauvage, voire en l'encourageant : plantation de buissons à papillons, zones à fleurs et herbes sauvages profitant aux abeilles, avec une fréquence de tonte moindre, petites mares pour accueillir les amphibiens, usage limité de pesticides.

Les grandes entreprises publiques ont également leur rôle à jouer dans la construction de ces barrières artificielles que sont les autoroutes et voies de chemin de fer. Dans leur cahier des charges, elles ont pour responsabilité

www.frenchpdf.com

d'aménager des tunnels écologiques qui passent sous ces grands axes pour favoriser le déplacement des espèces au sein de leur habitat, que ce soit des lièvres ou des grenouilles.

Les bénéfices de la biodiversité

Dans un monde régi par le profit, la biodiversité trouve son meilleur allié dans le soutien qu'elle apporte à l'économie. Si les grandes nations se sont déjà mobilisées contre le réchauffement climatique, ce n'est sans doute pas à cause d'une prise de conscience généreuse et altruiste visant à protéger les générations futures, mais pour des raisons bien plus pratiques exposées par les comptables : le coût du dérèglement climatique découlant des pertes de rendement agricole (sécheresse, inondations) et des catastrophes naturelles (destruction des infrastructures, populations réfugiées et santé publique) est estimé à près de 2 % du produit mondial brut, soit 1 000 milliards de dollars/euros par an.

Or la réduction de la biodiversité, avec chutes de populations animales et végétales, assorties d'extinctions d'espèces, pourrait représenter un gouffre similaire dans l'économie mondiale. Au-delà de considérations philosophiques et morales, la préservation de l'écosystème est donc une affaire d'argent, et il n'y a pas meilleure motivation pour qu'elle soit soutenue. Quantité d'exemples illustrent cette alliance économique, à commencer par celui des abeilles.

Les abeilles jouent un rôle crucial dans la pollinisation des plantes, c'est-à-dire qu'elles conditionnent les récoltes de céréales, fruits et légumes[1]. Or les populations d'abeilles sont en chute libre, que ce soit l'abeille domestique élevée pour son miel (*Apis mellifera*) ou les multiples espèces d'abeilles sauvages et de bourdons. Une étude conduite en Europe montre que sur les 400 espèces du vieux continent qui ont pu être recensées (il reste 1 600 espèces à évaluer, mais insuffisamment suivies pour l'instant), un bon tiers ont vu leur population chuter. Pour les bourdons, les risques d'extinction sont similaires.

La plus grande menace qui pèse sur ces précieux insectes concerne la destruction de leur habitat au travers de pratiques agricoles qui s'écartent aujourd'hui de la culture du foin et donc des prés à fleurs et herbes sauvages qui sont l'environnement préféré des abeilles. Le particulier, rappelons-le, peut participer à la sauvegarde des abeilles en laissant des îlots d'herbes et fleurs sauvages « en jachère » ou en les tondant moins fréquemment que le reste de son jardin.

L'usage abusif d'insecticides, tuant directement les abeilles, et d'herbicides détruisant leur environnement entre aussi dans la balance, tout comme le réchauffement climatique qui met en péril leur habitat à travers d'inhabituelles périodes de sécheresse ou au contraire de pluies trop soutenues.

L'impact économique du déclin des abeilles est énorme. La contribution qu'elles apportent en fécondant les cultures – augmentation de la quantité et de la qualité des récoltes – est estimée à 153 milliards de dollars/euros par an dans l'agriculture mondiale, dont 22 milliards d'euros pour la seule Europe. Une fraction importante de ce « capital » est donc menacée par le déclin des abeilles : déjà en 2007, les agriculteurs des États-Unis soulignaient une chute de 70 % de leurs colonies et estimaient la perte sèche à environ 10 milliards de dollars/euros par an. De nouveau, en 2014, ils enregistraient un nouvel effondrement de leurs colonies d'abeilles, cette fois de l'ordre de 40 %.

En 2015, l'administration Obama a d'ailleurs proposé des mesures pour tenter d'endiguer le phénomène, notamment en consacrant environ 3 millions d'hectares de terrain à la plantation de fleurs sauvages pour servir de havre supplémentaire aux abeilles. Les associations pour la défense de l'environnement ont salué le geste, mais précisent qu'il faudrait aussi, et en priorité, bannir l'usage de certains insecticides comme les néonicotinoïdes – comme l'a d'ailleurs déjà fait la Commission européenne en 2013 pour trois d'entre eux.

À l'inverse, dans le fragile et complexe équilibre de la nature, certains insectes sont nuisibles pour les cultures, mais gratuitement limités en nombre par des animaux insectivores. Travailleuses de l'ombre, les chauves-souris assurent une aide directe à l'agriculture, puisque moins de pesticides sont nécessaires là où elles œuvrent : les économies réalisées ont été estimées à 100 dollars/euros environ par hectare, l'agriculture américaine tirant globalement des chauves-souris une aide de l'ordre de 20 milliards de dollars/euros par an. Et c'est sans compter le bénéfice supplémentaire pour l'environnement que constitue l'usage plus modéré de pesticides.

Or les chauves-souris sont en danger, agressées notamment par un champignon microscopique, *Geomyces destructans*, qui se propage autour de leur museau (appelé pour cette raison « syndrome du nez blanc ») et dont on ignore l'origine et les vecteurs de propagation. Certaines espèces de chauves-souris, comme la très commune petite chauve-souris brune, ont été décimées en Amérique du Nord, avec une mortalité estimée à 75 % (plusieurs millions d'individus) entre 2006 et 2012. Leur protection, passant par le traitement et la prévention des maladies identifiées, devrait s'imposer au regard des spectaculaires économies que ces petits mammifères volants apportent à l'agriculture.

Nombreuses sont donc les espèces en déclin qui peuvent profiter d'un redressement à vocation économique, à partir du moment où l'on analyse de mieux en mieux le fonctionnement de l'écosystème. Un autre exemple particulièrement sympathique nous est offert par le faucon de Nouvelle-Zélande, dont la situation n'est pas encore

www.frenchpdf.com

gravissime, mais qui figure dans la catégorie des espèces « quasi menacées ».

La Nouvelle-Zélande dispose d'excellents vignobles qui représentent un chiffre d'affaires conséquent. Or plusieurs espèces de passereaux s'attaquent au raisin, dont trois espèces invasives (un merle, une grive et un étourneau) et une espèce endémique (le Zostérops à dos gris). Les premières prélèvent des raisins entiers ; le dernier les perfore de petits trous. Des faucons furent introduits dans une zone test du vignoble, où leur chasse aux passereaux a été tellement efficace que le nombre de raisins « volés » a diminué de 95 % (20 fois moins de pertes), et les perforations dues au Zostérops de 50 % (apparemment ce passereau endémique a une longue expérience des faucons et se laisse moins facilement intimider). Toujours est-il qu'au final, la surveillance exercée par les faucons se traduit par des économies estimées à environ 200 dollars/euros par hectare dans les vignes de sauvignon blanc et 300 dollars/euros dans celles de pinot noir. Comme les faucons introduits sont en train de se reproduire, une extension de leur surveillance aux quelque 25 000 hectares de la région viticole pourrait se traduire par des économies de l'ordre de 5 millions de dollars/euros par an. Voilà qui devrait assurer leur pérennité.

Toutes les espèces n'ont pas une rentabilité aussi clairement étudiée et affichée que l'abeille, la chauve-souris ou le faucon des vignes, mais il est à espérer que les pouvoirs publics, tout comme les citoyens, comprendront qu'à tous les niveaux de l'écosystème, la survie des espèces et la bonne santé de leurs populations sont source de bénéfices invisibles et difficilement quantifiables, sauf lorsqu'elles disparaissent et que la facture éclate soudain au grand jour. Qui se douterait que les fourmis, par exemple, améliorent les récoltes de blé dans les régions arides de l'ordre de 35 %, grâce aux tunnels qu'elles creusent dans le sol et qui facilitent l'infiltration d'eau, et qu'elles protègent les plantes en général de nombreux insectes et moisissures nuisibles ? Sans compter la valeur pharmaceutique des molécules qu'elles synthétisent et qui sont utilisées dans les médicaments contre l'asthme et l'arthrite.



Quand l'opération profite à tous : les vignobles de Nouvelle-Zélande étaient attaqués par des passereaux ; les propriétaires ont rétorqué en introduisant des faucons, espèce en voie d'être menacée. Les faucons se chargent des passereaux, prospèrent, et les raisins sont beaucoup moins attaqués, entraînant des gains substantiels pour les vignerons. (© Falcons for Grapes Project/Wither Hills & Lake Chalice vineyards.)

Et que dire du corail (qui abrite, rappelons-le, 25 % de toutes les espèces marines), fracassé par les ancres de bateaux et les palmes de plongeurs maladroits, menacé par l'effet de serre et la hausse de température des mers ? Là aussi, sa préservation est source de profit et a donc de fortes chances d'aboutir. Une gestion saine des récifs, assortie de techniques de pêche intelligentes, génère annuellement 15 tonnes de poissons et fruits de mer au kilomètre carré : rien qu'en Asie du Sud-Est, cette pêche rapporte 2,5 milliards de dollars/euros par an.

L'intérêt des récifs ne s'arrête pas là : le tourisme de la plongée sous-marine dépend de leur bonne santé, ce qui représente un revenu important, et de façon plus indirecte les barrières de corail assurent la protection du littoral en absorbant en première ligne l'énergie des vagues et tempêtes. En additionnant tous ces bienfaits, la valeur économique globale des récifs coralliens se situe quelque part entre 30 et 300 milliards de dollars/euros par an. On peut donc espérer que l'intérêt économique seul suffira à motiver les États riverains à sauvegarder leur corail.

Faisant pendant sur la terre ferme aux récifs coralliens en termes de biodiversité, les forêts vierges bénéficient déjà, on l'a vu, d'un soutien gouvernemental important en termes de constitution de parcs et réserves, et de protection de l'habitat. Mais une logique économique ne sera pas de trop pour sauvegarder ces importants écosystèmes et, heureusement, elle aussi existe. Bien sûr, on ne répétera jamais assez que la forêt vierge abrite des milliers de plantes médicinales, dont de nombreuses restent encore à découvrir, et notamment plus de 2 000 plantes aux vertus anticancérigènes (comme la vincristine, extraite d'une pervenche de Madagascar).

Mais sans aller aussi loin, car seul un profit à court terme et directement percevable peut enjoindre aux habitants de ne pas massacrer leurs forêts, une étude de Charles Peters (Institut d'économie botanique de New York), qui

www.frenchpdf.com

date de 1989 mais n'a pas perdu de sa pertinence, fait valoir que si l'abattage des arbres pour convertir la forêt amazonienne en pâturage à bétail peut rapporter annuellement 150 dollars/euros à l'hectare, et 1 000 dollars/euros en vendant le bois coupé sans reboisement (profit unique non renouvelé), une gestion intelligente de la forêt pour son bois, son latex et ses fruits, sous un régime de développement durable, peut rapporter *annuellement* près de 7 000 dollars/euros à l'hectare. C'est sur la base de tels arguments que la forêt amazonienne et les forêts vierges en général pourront être préservées.

Rebâtir l'écosystème

On peut mieux faire que simplement limiter la casse et endiguer la chute des populations et l'extinction des espèces : l'offensive étant la meilleure défense, le salut de la biosphère, et de l'homme qui en dépend, passe aussi par la réintroduction d'espèces menacées dans leurs habitats historiques ou dans de nouveaux habitats afin de retisser la trame de l'écosystème. Cette stratégie fait également passer le message qu'hommes et animaux ont pour vocation de cohabiter et que leur séparation antérieure était contre nature.

Ces réintroductions d'animaux sauvages ont d'abord concerné les espèces pratiquement éradiquées que sont les grands carnivores, au sommet de la pyramide alimentaire et donc peu nombreux au départ et chassés par l'homme, car menaçant ses troupeaux ou souffrant d'une mauvaise réputation, comme le loup, l'ours ou encore le lynx. Ces animaux occupent une place importante dans la fonction d'un écosystème, régulant sa structure et sa diversité « par le haut » (*top-down*, comme disent les anglophones), mais leur réintroduction ne se fait pas sans heurts, vu la réticence compréhensible des éleveurs qui doivent concéder quelques pertes en bétail à cette cohabitation imposée. Cette nouvelle donne doit donc s'accompagner d'une certaine ouverture d'esprit et de mesures compensatoires.

Cela étant, le succès est au rendez-vous, notamment en Europe. À la différence des États-Unis ou de l'Afrique du Sud qui ont misé sur le concept de la séparation des prédateurs et des hommes, en confinant les premiers à des parcs et réserves, l'Europe a misé sur cette philosophie différente qu'est la coexistence des uns et des autres sur le même terrain, décision d'autant plus précieuse pour les grands carnivores que ceux-ci ont besoin d'un espace de circulation particulièrement important pour que leurs populations s'épanouissent.

La réintroduction d'ours, loups, lynx et gloutons (wolvérènes) dans leurs habitats d'origine a permis d'atteindre des chiffres très encourageants : 17 000 ours bruns occupent désormais un total de 500 000 kilomètres carrés en Europe (la superficie de la France) en une dizaine de groupes répartis sur 22 pays, suivis par le loup (12 000 individus, 800 000 kilomètres carrés, 28 pays) et le lynx (9 000 individus, 815 000 kilomètres carrés, 23 pays). Limité aux pays scandinaves, le glouton compte pour sa part 1 250 individus sur 250 000 kilomètres carrés.

Comme le note Guillaume Chapron, chercheur à l'université suédoise de sciences agricoles, et ses coauteurs qui ont réalisé cette étude, ce qui est encourageant pour l'avenir, c'est que ces grands carnivores arrivent à circuler dans un habitat relativement fragmenté, panachant forêts et terres agricoles, et où la présence humaine est importante (20 à 40 habitants au kilomètre carré). Un tel succès dans la cohabitation n'a été possible que grâce à une législation mise en place par des pays aux régimes politiques particulièrement stables depuis la Seconde Guerre mondiale, soutenue par des associations écologiques efficaces, grâce au soutien, en parallèle, accordé aux espèces sauvages d'ongulés (chevreuils, bouquetins, chamois et autres) qui font partie de leurs proies, ainsi que grâce à des techniques de protection du bétail : revalorisation du rôle des bergers, aidés de leurs chiens, et enclos pour parquer les troupeaux la nuit.

Il s'agit d'un début, et les premières espèces à profiter d'un soutien important en matière de repeuplement sont logiquement celles qui bénéficient d'une cote de popularité importante : 40 % des projets de réintroduction faunique concernent les mammifères et 33 % les oiseaux. Reptiles, amphibiens, poissons et invertébrés sont encore à la traîne, mais leur heure viendra.

C'est déjà le cas des tortues, notamment des grandes tortues terrestres dont on a compris qu'elles jouent un rôle essentiel dans la dispersion des graines de plantes qu'elles ingèrent, et elles le font sur de grandes distances (souvent plusieurs kilomètres), malgré leur réputation de lenteur, car leur système digestif est tout aussi lent. On pense donc à réintroduire des tortues dans nombre d'îles du Pacifique pour aider à remettre en état leurs écosystèmes.

La réintroduction des espèces est donc une science subtile, où il faut comprendre non seulement les besoins de l'animal, mais tous les rôles qu'il joue dans son environnement – la bonne santé de l'écosystème en général étant plus importante que celle de ses membres pris séparément. Ainsi, il ne faut pas se borner à réintroduire à grands frais un animal en voie d'extinction, si l'on peut lui substituer un autre animal qui a de meilleures chances de s'implanter et qui peut assurer les mêmes fonctions dans l'environnement en question.

Un autre facteur qu'il ne faut pas perdre de vue, c'est le glissement des courbes de température et d'humidité, en latitude et en altitude, qu'engendre le réchauffement climatique. Il ne faut donc pas se limiter à un repeuplement des espèces menacées dans leurs habitats d'origine, car ceux-ci ne vont bientôt plus leur convenir. D'ailleurs les réserves d'antan, que ce soit en Afrique ou ailleurs, vont bientôt se heurter à cette problématique. Grâce au suivi désormais très pointu du réchauffement climatique, et aux prévisions de son évolution sur le court et moyen terme,

www.frenchpdf.com

région par région, il faudra déplacer certaines populations animales – ou en tout cas réintroduire de nouveaux groupes – ailleurs que là où elles survivent actuellement.

Vers la résurrection

Une autre voie s'offre à l'homme pour réparer les dégâts qu'il a occasionnés au sein de la biosphère terrestre. Au-delà de la protection des espèces survivantes, il peut aujourd'hui rêver de ressusciter des espèces disparues.

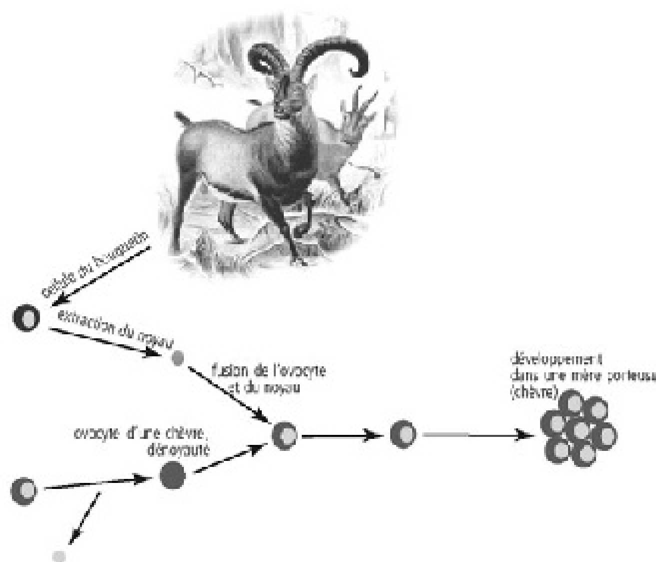
Un *Jurassic Park*, version moderne ? L'idée développée sous la plume féconde de Michael Crichton est loin d'être absurde et ne se heurte actuellement qu'à des problèmes techniques, comme la mauvaise préservation du matériel génétique d'espèces disparues, notamment parce que de telles manipulations n'étaient pas envisagées jusqu'à présent sur les cadavres récupérés, et leur préservation non conduite à cet effet. Bien sûr, on ne parle pas ici de dinosaures, mais les perspectives d'aboutir à un clonage réussi, pour les espèces récemment disparues et dont on retrouve actuellement des restes, s'améliorent d'année en année.

Le cas du mammouth laineux est à ce titre particulièrement symbolique. Il représente, on l'a vu, l'une des premières victimes des extinctions dues à l'homme, à savoir le massacre de la mégafaune glaciaire, il y a environ 15 000 ans. Il se distingue aussi par nombre de cadavres congelés dans le pergélisol de Sibérie et qui réapparaissent en surface : un cadeau – il en faut quand même – du réchauffement climatique. La stratégie consiste à récupérer les chromosomes d'un mammouth à partir du noyau d'une cellule bien préservée sur un cadavre, et de les transplanter dans l'ovule d'une éléphante qui servirait de mère porteuse.

Jusqu'à présent, les biologistes trouvaient insuffisante la qualité du matériau génétique dérivé des carcasses actuelles pour tenter l'expérience. Mais un nouveau cadavre trouvé en 2013 et mieux préservé a relancé les espoirs. Au pire, seulement les gènes les mieux conservés pourraient être introduits dans l'ovule de l'éléphante, pour donner à l'éléphanteau quelques traits du mammouth, comme son long poil ou sa couche de graisse contre le froid. Si jamais un tel clonage vient à réussir, il y a en tout cas un site qui pourrait lui ouvrir ses portes : *Pleistocene Park*, une réserve créée par Sergueï Zimov en Sibérie orientale, où le chercheur russe tente de reconstituer la steppe disparue de l'âge glaciaire en introduisant de grands herbivores, comme des bœufs musqués et des wapitis, pour défricher la forêt.

De même, l'idée fait son chemin de ramener à la vie le défunt thylacine ou tigre de Tasmanie – ce carnivore marsupial dont le dernier sujet s'est éteint dans le zoo de Hobart en 1936. Un spécimen de thylacine préservé dans du formol depuis 1866 pourrait fournir le précieux matériel génétique nécessaire, quoique les premières études conduites au début des années 2000 aient trouvé l'ADN trop dégradé pour tenter l'expérience. La mère porteuse est en tout cas déjà connue : ce serait le diable de Tasmanie, un carnivore marsupial assez proche. En attendant, à défaut d'insérer le génome complet du thylacine dans sa cousine, des fractions de gène en bon état ont été importées et cultivées avec succès dans des souris de laboratoire.

Dans le même élan qui profite aux espèces emblématiques, les écoliers d'un collège néo-zélandais ont lancé le projet de ressusciter l'oiseau mascotte de leur école : le huia, disparu comme on l'a vu depuis les années 1960. Une start-up de la bulle internet a même promis 100 000 dollars pour soutenir l'opération, mais l'expérience a là aussi peu de chances d'aboutir, vu la mauvaise qualité du matériel génétique prélevé sur des oiseaux empaillés.



www.frenchpdf.com

Clonage du bouquetin

La résurrection d'espèces disparues par clonage est à l'étude. La technique consiste à reprendre une cellule d'un individu décédé, extraire son noyau, et l'implanter dans l'ovocyte d'un animal proche qui sert de mère porteuse. Cette technique a été expérimentée sur le bouquetin des Pyrénées, sous-espèce éteinte des chèvres sauvages. (D'après 15ldavenport/Wikimedia [CC BY-SA 4.0], dessin de bouquetin de Joseph Wolf.)

Le grand oiseau coureur moa, disparu depuis plusieurs siècles, a paradoxalement plus de chances de ressusciter aux mains des ingénieurs en génétique, en tout cas aux dires du chercheur japonais Yasuyuki Shirota de l'université d'Hirosaki, qui s'est lancé dans l'extraction de son ADN. De même, le pigeon migrateur, dont l'extinction a laissé bien des regrets chez les ornithologues américains, figure lui aussi sur la liste des candidats à ressusciter, tout comme le dodo de l'île Maurice.

Rêves que tout cela ? Loin de là, car le génie génétique est à deux doigts d'enregistrer ses premiers succès. L'exemple le plus encourageant est la série de tentatives conduites sur le bouquetin des Pyrénées, cette sous-espèce de chèvre sauvage dont la dernière représentante est décédée en l'an 2000.

Les généticiens avaient eu l'occasion de prélever du matériel génétique sur l'animal avant sa mort, et dès 2003 des ovules de chèvres domestiques étaient mis à contribution pour accueillir les gènes du défunt animal, d'abord sans succès. Lors d'une seconde tentative en 2009, sur les quelque 200 chevrettes nouvellement inséminées de cette façon, une seule porta un bouquetin à terme, mais le nouveau-né succomba au bout de sept minutes, suite à une insuffisance respiratoire. On peut toutefois considérer cette mise au monde comme étant la première résurrection d'une espèce disparue (ou d'une sous-espèce en l'occurrence), même si elle fut bien trop brève. Les chercheurs sont d'ailleurs prêts à conduire une nouvelle tentative.

Tout aussi prometteur fut le clonage réussi en 2013 de la défunte grenouille *Rheobatrachus* d'Australie (que nous avons présentée page 264), bien que les têtards n'aient survécu que quelques jours. Les chercheurs de l'université de Newcastle, à l'origine de l'expérience, ont souligné qu'il s'agissait là d'un bel encouragement pour constituer des banques génétiques – banques de sperme, d'ovules et d'ADN en général – de toutes les espèces menacées, qui constitueraient d'une certaine façon leur police d'assurance contre l'extinction.

C'est effectivement une bonne idée, bien que sa mise en application serait particulièrement coûteuse : à titre d'exemple, le clonage et la résurrection du tigre de Tasmanie impliqueraient un budget minimal de 50 millions de dollars/euros.

Une idée parallèle consiste à commencer le clonage d'espèces avant qu'elles ne disparaissent. Des tests ont déjà été conduits sur deux bovidés en danger d'extinction : le gaur ou bison indien (*Bos gaurus*) et le banteng (*Bos javanicus*), en utilisant des vaches ordinaires comme mères porteuses. Sur des espèces encore en vie, l'opération est en effet beaucoup plus facile, et l'un des bantengs clonés a vécu sept ans dans le zoo de San Diego. C'est dans ce même zoo que se trouve d'ailleurs l'une des plus importantes banques de matériel génétique congelé, prélevé à partir de 10 000 animaux représentant 1 000 espèces différentes.

Clonage puis gardiennage des espèces ont toutefois un coût, alors que l'écosystème terrestre s'est jusqu'à présent autogéré tout à fait gratuitement. Nos efforts devraient donc porter en priorité sur la préservation de l'environnement, et notamment la régulation du climat, plutôt que de courir après les problèmes avec des rustines. Plus que jamais, le vieil adage « mieux vaut prévenir que guérir » est de circonstance. C'est l'affaire de tous et la solution réside dans notre prise de conscience des dégâts qu'occasionne notre fuite en avant matérialiste, dans le refus du confort superflu s'il est source de destruction pour la biosphère, et dans la simple appréciation d'une planète qui a tant de merveilles à partager avec nous. À l'image de Candide, à chacun de nous de cultiver intelligemment son jardin.

1.

Les insectes en général assurent 75 % de la pollinisation des cultures mondiales, une contribution chiffrée à 10 % de la valeur des récoltes.

www.frenchpdf.com

Épilogue
Sommes-nous menacés d'extinction ?

Nous évaluons l'état de santé de nombreuses espèces qui nous entourent et notamment leur probabilité d'extinction. Mais qu'en est-il de notre propre espèce *Homo sapiens* ?

Comme toute espèce, nous avons connu un début – lorsque nous nous sommes individualisés au point de mériter notre propre appellation d'*Homo sapiens*, à partir de 200 000 ans environ – et nous connaîtrons une fin, lorsque nous disparaîtrons de la surface de la Terre sans descendance, ou avec un peu de chance lorsqu'un rameau de notre espèce s'en sera séparé avant son déclin, lançant un nouveau modèle humain suffisamment truffé de modifications génétiques innovantes pour continuer l'aventure sous un autre nom. Cette nouvelle espèce évoquera alors avec tendresse l'époque où elle a émergé de son ancêtre *Homo sapiens*, de même que nous étudions aujourd'hui cet autre moment charnière de l'évolution, lorsque nous nous sommes affranchis de notre prédécesseur *Homo erectus* en Afrique de l'Est pour voler de nos propres ailes.

À cet égard, nous avons une lourde responsabilité. Au cours des trois derniers millions d'années, le genre australopithèque, puis le genre humain ont accouché de nombreuses espèces parallèles, au point que l'on ne parle pas d'une ligne évolutive isolée menant à l'homme moderne, mais d'un buisson foisonnant dont nous n'étions qu'une branche parmi d'autres, jusqu'à tout récemment.

Il y a 50 000 ans, nous étions encore trois candidats en lice : *Homo sapiens*, *Homo neanderthalensis* et *Homo floresiensis*, ce dernier perpétuant en Indonésie un modèle archaïque d'*Homo erectus* jusqu'à s'éteindre il y a 18 000 ans environ. En Occident, les deux autres finalistes ont partagé la scène jusqu'à ce que nous prenions finalement l'ascendant sur l'homme de Néandertal dans des conditions encore mystérieuses (voir encadré), au point d'être aujourd'hui la seule espèce survivante du genre humain.

Si nous avons la mauvaise idée de disparaître, c'est donc à toute l'histoire complexe et merveilleuse du genre *Homo* – ces primates bipèdes dotés de conscience et de raison – que nous mettrions fin : il n'y a pas de remplaçant sur le banc de touche. Quoique la nature regorge d'espèces animales douées d'une intelligence remarquable – des chimpanzés aux dauphins, en passant par nombre d'oiseaux – et à supposer qu'on ne les entraîne pas dans notre disparition, il est possible que l'une d'entre elles parvienne à continuer son évolution cérébrale au point de nous remplacer et de prendre conscience de l'Univers, s'interroger sur le sens du monde, percer les secrets de l'atome et écrire des symphonies. Mais jusqu'à preuve du contraire, nous sommes les derniers récipiendaires de cet héritage, et, si tant est qu'elle ait de la valeur, notre responsabilité envers l'univers qui nous a enfantés est donc énorme.

Que d'autres civilisations existent dans notre galaxie et dans l'univers au sens large nous soulagerait quelque peu en diluant notre importance – tant pis pour notre orgueil – mais rien ne nous conforte dans cette idée : nous aurons l'occasion d'y revenir.

Si les raisonnements auxquels nous nous livrons dans cet épilogue sont hautement spéculatifs et reposent plus sur des concepts subjectifs que sur des analyses et des modèles, ils n'en permettent pas moins une réflexion sur notre destin possible, ou plutôt sur nos destins possibles.

Dans un premier temps, il faut poser correctement le problème et faire la distinction entre l'extinction de l'espèce humaine et l'effondrement de la civilisation telle que nous la connaissons, sans que « l'animal » lui-même ne disparaisse.

Pour ce qui est des civilisations, l'histoire nous enseigne qu'elles n'ont qu'un temps et implosent éventuellement sous le poids de leurs propres contradictions ou sous le coup d'un agent extérieur. Aujourd'hui, surpopulation, dérèglement climatique et destruction de l'équilibre de la biosphère constituent les menaces les plus tangibles. Mais on peut se consoler en supposant que si la société de consommation actuelle vient à s'effondrer, elle sera remplacée par une autre organisation sociale, sans que l'homme lui-même ne soit éradiqué en tant qu'espèce.

Exterminer *Homo sapiens* est en effet une autre paire de manches. C'est une évidence, mais il est bon de le souligner : nous n'avons pas encore disparu, ce qui est déjà un point en notre faveur. Au passage, ce constat mérite d'être approfondi : avons-nous déjà, au cours de nos quelque 200 000 ans d'existence en tant qu'espèce, frôlé l'extinction ? Pour nombre d'anthropologues, il semblerait bien que oui.

Sapiens contre Néandertal

Le genre humain a déjà connu une extinction récente qui nous force à réfléchir : celle de notre proche cousin, l'homme de Néandertal. Ce rameau de la lignée humaine a quitté l'Afrique bien avant notre propre espèce, il y a près de 400 000 ans, et continué son évolution en Eurasie, développant un corps trapu et robuste bien adapté au

www.frenchpdf.com

froid, des arcades sourcilières proéminentes et un menton fuyant, une culture empreinte de rites mystico-religieux (enterrement des morts), un art rupestre primitif et vraisemblablement une forme de langage.

L'homme de Néandertal s'est toutefois éteint, il y a environ 40 000 ans d'après les dernières datations de ses squelettes fossiles. Or notre espèce *Homo sapiens* (« l'homme de Cro-Magnon ») venait de débarquer en Eurasie peu de temps auparavant, il y a environ 42 000 ans. Le débat fait donc rage de savoir si nous sommes responsables ou non de sa disparition.

Pour nous disculper, on a avancé que notre cousin a simplement succombé au durcissement du climat à l'époque, mais ce serait paradoxal : son anatomie montre une adaptation au froid meilleure que la nôtre. Et si l'analyse de son ADN suggère une chute de sa population il y a environ 50 000 ans, rien ne permet d'associer ce déclin au climat (du reste, *Homo sapiens* a connu le même étranglement inexpliqué de sa population autour de la même époque, et lui a survécu, comme nous le décrivons par ailleurs).

Les analyses d'ADN des deux espèces cousines font ressortir un autre élément intéressant : notre génome contient environ 1 à 3 % de gènes néandertaliens, preuve que nos populations se sont mêlées, il y a environ 60 000 à 50 000 ans d'après les calculs, donc apparemment au Moyen-Orient avant notre arrivée en Europe. Mais le métissage fut limité, l'analyse suggérant que seul un petit nombre d'*Homo sapiens* ont interagi au sein d'un groupe beaucoup plus important de Néandertaliens : nous n'avons donc pas « absorbé », comme on peut le lire parfois, l'espèce néandertalienne au travers d'un métissage global.

Si l'on écarte « l'étouffement » génétique de l'espèce et l'influence du climat, il ne reste plus, pour expliquer la disparition de l'homme de Néandertal il y a 40 000 ans, que la concurrence avec *Homo sapiens*, débarqué en nombre en Eurasie précisément à cette époque. Les études anthropologiques nous l'enseignent : lorsque deux populations se rencontrent sur un même territoire, la compétition pour ses ressources, notamment le gibier, débouche souvent sur la guerre. Or notre espèce avait de toute évidence une longueur d'avance sur Néandertal en ce domaine, avec la maîtrise des armes de jet et vraisemblablement une meilleure faculté de communication et donc de tactique.

Une domination martiale ne fut peut-être même pas nécessaire pour évincer l'homme de Néandertal : la concurrence pour les ressources a pu suffire. La mégafaune dont celui-ci dépendait se serait rapidement effondrée lors du débarquement et de la chasse organisée menée par *Homo sapiens*. Si ce dernier a pu ensuite se retourner sur le petit gibier pour survivre, son cousin n'a sans doute pas eu la même flexibilité. Il est d'ailleurs intéressant de noter qu'à notre époque, et cette fois sciemment, les Européens ne s'y sont pas pris autrement pour tenter d'exterminer les Amérindiens, en massacrant à la carabine les bisons dont ils dépendaient.

L'éruption du Toba

On a vu que l'effondrement du nombre d'individus au sein d'une espèce peut signaler une extinction prochaine. Or l'espèce humaine est passée, au dire des biologistes qui reconstituent son histoire à travers l'étude de son génome, par des goulots d'étranglement où sa population s'est retrouvée particulièrement réduite.

La technique est complexe mais on peut en effet estimer, d'après la diversité génétique au sein de l'ADN humain, quelle a été la taille de la population ancestrale dont nous descendons, et cela à différentes époques du passé.

C'est ainsi que les premières études du genre ont révélé qu'il y a environ 100 000 à 50 000 ans, la population humaine a chuté pour atteindre un minimum d'environ 20 000 individus dont nous serions issus, soit la population d'une ville comme Lisieux : nous serions en quelque sorte des miraculés.

De façon tout à fait indépendante, les géologues se sont rendu compte qu'il y a 75 000 ans s'est déroulée l'une des plus violentes éruptions volcaniques que la Terre a connues : celle du Toba en Indonésie, qui a éventré la croûte terrestre en une caldera elliptique de 100 kilomètres de long sur 30 kilomètres de large, expulsant 3 000 kilomètres cubes de magma, dont presque un tiers sous forme de cendres qui ont pollué l'atmosphère. Il n'en fallait pas plus pour que géologues et anthropologues fassent le rapprochement, émettant l'hypothèse que l'éruption du Toba a déclenché un « hiver nucléaire », obscurcissant l'atmosphère et faisant chuter la température mondiale de plusieurs degrés (5 °C à 15 °C selon les premiers calculs) durant plusieurs années, au point que certains y voient le détonateur de la dernière période glaciaire. Frappée par le refroidissement et la famine associée, notre population ancestrale en Afrique aurait vacillé jusqu'au bord de l'extinction, crise qui aurait par ailleurs précipité sa migration hors d'Afrique, laquelle se déroule justement, *grosso modo*, à la même époque.

Le scénario est séduisant, proposé dans les années 1990 par la journaliste scientifique Ann Gibbons et soutenu par le spécialiste des catastrophes naturelles Michael Rampino et par l'anthropologue Stanley Ambrose. Passé au banc de la critique scientifique, toutefois, ce scénario ne tiendra que quelques années. Si l'âge de l'éruption est bien connu à quelques siècles près (75 000 ± 900 ans), celui de l'étranglement de la population humaine l'est beaucoup moins, ce qui empêche de valider la coïncidence chronologique. En revanche, il est possible de rechercher dans les sédiments des lacs africains la trace de l'éruption et d'un éventuel refroidissement associé.

www.frenchpdf.com

Dès 2013, le doute est jeté. Un forage effectué au fond du lac Malawi – le plus méridional des grands lacs du rift est africain – a révélé dans ses sédiments le déroulement du climat à l'époque avec une grande précision, et l'on y trouve la couche de fins cristaux volcaniques émis par le Toba et transportés par le vent à travers l'océan Indien.

Or s'il y avait eu refroidissement concomitant du climat en Afrique, on se serait attendu à un retournement des eaux du lac1, avec une faune différente des espèces de plancton en surface et une prolifération de mollusques sur le fond oxygéné par le retournement. Ce n'est pas du tout ce que l'on observe – l'écosystème du lac reste inchangé –, de sorte que non seulement l'éruption du Toba n'a pas mis en danger l'espèce humaine, mais un doute supplémentaire est jeté quant à l'importance que peuvent avoir les grandes éruptions volcaniques sur le déroulement de la vie sur Terre.

Si le Toba est disculpé, il n'en demeure pas moins que l'espèce humaine a connu une « marée basse » de sa population à une certaine époque il y a 100 000 à 50 000 ans, sans que l'on en connaisse la cause exacte. À force d'affiner leurs études du génome humain, les anthropologues calculent aussi qu'un autre goulot d'étranglement aurait eu lieu il y a 1,2 million d'années, alors que nos ancêtres en étaient au stade *Homo erectus*, avec pareillement une population inférieure à 30 000 individus reproducteurs. Selon d'autres interprétations encore, la population de nos ancêtres aurait pu rester étriquée tout au long du dernier million d'années, le goulot d'étranglement ressemblant plus au long col de la fable *Le Renard et la Cigogne* qu'au court goulot d'une bouteille de bourgogne.

Toujours est-il que si l'espèce humaine a risqué de disparaître, c'est bien lors de ses balbutiements africains, quand non seulement sa population a été minimaliste, mais qu'elle s'est cantonnée à une aire géographique limitée, principalement autour des lacs du Grand Rift. Une crise régionale, par exemple une pandémie, aurait eu plus de chance d'éradiquer notre espèce dans ce contexte qu'aujourd'hui, quand notre population dépasse sept milliards d'individus et qu'elle est désormais disséminée sur toute la planète.

Or, à la réflexion on peut être pris d'un doute, car les conditions depuis notre éclosion africaine ont bien changé.

Pandémie et guerre bactériologique

Si l'on s'en tient aux critères de l'UICN pour sa liste des espèces menacées, avec sa population et son aire d'occupation en hausse constante, l'espèce humaine devrait être classée dans la catégorie « préoccupation mineure ». Or la situation est moins confortable qu'il y paraît, car une forte population ne met pas notre espèce à l'abri d'un danger global : le premier exemple qui vient à l'esprit est celui d'une pandémie, qu'elle soit naturelle ou déclenchée par l'homme lui-même.

Une pandémie est une épidémie qui se propage sur une large région, voire en ce qui concerne notre propos sur la Terre entière. La responsabilité d'une bactérie ou d'un virus a autrefois été invoquée pour expliquer l'extinction mystérieuse d'espèces animales, notamment celle des dinosaures2. Aujourd'hui, cette éventualité resurgit sur le devant de la scène : on a vu comment les amphibiens, en particulier au Costa Rica, subissent des extinctions d'espèces sous le coup de champignons parasites (voir page 225). Plus près de nous, chez les mammifères, l'antilope saïga des steppes asiatiques a perdu au printemps 2015 la moitié de sa population à la suite d'une épidémie explosive de la bactérie *Pasteurella*, favorisée par le stress climatique, de sorte qu'elle vacille au bord de l'extinction (voir page 225).

La population humaine n'échappe pas à ce risque, comme l'ont montré plusieurs pandémies mortelles au cours de son histoire récente. Déjà au XIV[e] siècle – entre 1346 et 1352 précisément – la peste bubonique a massacré 25 millions de personnes en Europe, soit le tiers de la population, et on estime que l'Asie fut pareillement affectée.

Record battu au XX[e] siècle, mais en nombres absolus plutôt que relatifs : la grippe espagnole a fait près de 100 millions de victimes en deux ans seulement (1918-1919) sur une population mondiale de deux milliards d'individus, soit une mortalité de l'ordre de 5 %. Mais les statistiques auraient pu être beaucoup plus graves si le virus avait été plus létal : c'est en effet la moitié de la population mondiale qui fut contaminée par cette grippe, et « seulement » une personne infectée sur dix a perdu la vie.

La grippe espagnole illustre en tout cas que dans notre monde moderne, les mouvements importants et rapides de population rendent globales des épidémies qui autrefois n'auraient affecté que des régions, sans mettre en danger la survie de l'espèce humaine dans son ensemble. Déjà la peste noire de 1346-1352, couvée en Chine, fut propagée en Europe par l'invasion de troupes mongoles. Quant à la grippe « espagnole », son nom est trompeur3, car elle aussi apparut d'abord en Chine, passa aux États-Unis par le biais d'un bataillon américain rapatrié, où elle muta en sa version mortelle avant d'être introduite en Europe par de nouveaux mouvements de troupes.

À l'heure actuelle où les mouvements de population ont atteint une ampleur et une vitesse inégalées, la propagation d'une pandémie peut donc être redoutable, au point de menacer notre espèce. Il faudrait pour cela la conjonction de deux facteurs, dont la probabilité est loin d'être négligeable : que le virus soit très contagieux, et qu'il soit fatal et imparable. Le virus de la grippe remplit le premier critère, mais n'a heureusement pas la nocivité de la peste ou de la variole. Toutefois, la nature accouche de nouveaux modèles viraux à marche forcée,

www.frenchpdf.com

notamment à cause du terreau extrêmement favorable que constitue la promiscuité entre oiseaux, porcins et êtres humains.

Les oiseaux sont porteurs d'une vaste palette de virus, et par le biais d'espèces domestiques comme les canards, ces virus sont alors transmis dans nos élevages aux mammifères et notamment aux porcs qui servent d'incubateurs et de réservoirs où se déroulent nombre de croisements qui accouchent de nouvelles espèces virales. Or le génome du porc est très proche du génome humain, et un virus passant de l'un à l'autre peut parasiter notre espèce, ainsi que le prouvent nos grippes aviaires et porcines. Tant qu'elles ne tuent qu'une fraction minime des individus infectés – 0,02 % pour l'épidémie A-N1H1 de 2009-2010 qui n'a fait « que » 300 000 victimes environ à travers le monde –, de telles pandémies ne sont pas une réelle menace pour le genre humain.

Mais le jour où cette virulence sera doublée d'une létalité hors normes, notre espèce pourra trembler. Elle le pourra d'autant plus qu'à force de brûler ses dernières cartouches de défense, à savoir les antibiotiques administrés à outrance chez les humains et chez les porcins qui nous fabriquent les derniers modèles de virus, ces derniers deviennent de plus en plus résistants à nos traitements. La recherche médicale est désormais au pied du mur et tente de garder une longueur d'avance sur nos petits ennemis, ce qui l'oblige à les développer et à les muter en laboratoire pour les étudier.

Un nouveau péril pour l'espèce humaine découle alors, paradoxalement, de cette recherche de pointe, car bien qu'elle soit indispensable et vertueuse dans le but de nous protéger, elle peut aussi déraper par accident – fuite d'un germe dangereux – ou bien servir en situation de guerre à des militaires ou à des terroristes, jusqu'à échapper complètement à leur contrôle.

L'homme contre l'homme

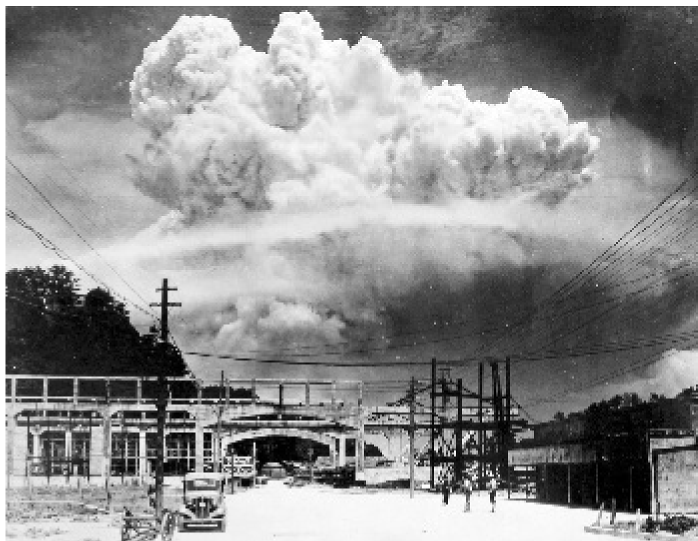
Le risque d'un virus échappant à ses ingénieurs est réel. Sur la cinquantaine de laboratoires de classe « P-4 » (BSL-4 en anglais) à travers le monde, qui manipulent de dangereuses substances biologiques pour lesquelles il n'existe encore aucun remède, un accident fatal a été rapporté dans l'enceinte d'un établissement (décès d'un chercheur russe en 2004, exposé au virus Ebola), ainsi qu'un accident fatal en dehors, lorsqu'un chercheur a quitté son laboratoire de Taïwan en décembre 2003, sans réaliser qu'il s'était infecté, et a transmis le coronavirus du SRAS (Syndrome respiratoire aigu sévère) à sa mère, causant son décès : la propagation du virus s'est heureusement arrêtée là.

Mais bien plus qu'une fuite accidentelle, le risque le plus dangereux pour l'homme est la création d'un virus « de guerre », spécialement manufacturé pour exterminer l'ennemi. Un conflit même local, un détournement terroriste ou une simple erreur de manipulation pourrait alors mettre en danger l'humanité tout entière : les films catastrophe n'ont pas manqué d'exploiter ce filon.

On peut tenter de se rassurer en supposant que des populations excentrées du champ de bataille et des couloirs de propagation du virus survivraient à cette pandémie artificielle, ou bien développeraient une immunité, de sorte que l'espèce humaine ne serait pas totalement anéantie. En poussant le curseur de l'optimisme jusqu'au bout, on pourrait même souligner la chance des rescapés, car les infrastructures industrielles et agricoles n'auraient pas été touchées, de sorte qu'ils se retrouveraient à leur tête, débarrassés des problèmes de surpopulation : après tout, ce ne serait qu'un exemple particulier de l'économie de guerre, poussée aux limites de son absurdité.

Une guerre nucléaire mondiale aurait une portée plus grave, dans la mesure où elle détruirait nombre d'infrastructures et pourrait soulever assez de poussière et de suie de combustion dans l'atmosphère pour refroidir le climat et plomber l'agriculture : le scénario catastrophe de « l'hiver nucléaire ». Au bilan immédiat du conflit se grefferait alors un effondrement prolongé de la population, chaos et désordre climatique appelant pandémies et autres sources d'étranglement de la population humaine, jusqu'à menacer d'éteindre l'espèce.

www.frenchpdf.com



Champignon atomique au-dessus de Nagasaki, le 9 août 1945, au lendemain d'Hiroshima. Les deux bombes atomiques larguées par l'US Air Force ont fait 130 000 morts. Aujourd'hui, les bombes nucléaires de l'arsenal mondial sont 50 fois plus puissantes. (© Hiromichi Matsuda.)

Or une guerre nucléaire est loin d'être improbable : on pourrait même dire que l'humanité est chanceuse de ne pas en avoir connu.

On se souvient bien sûr de la crise des missiles de Cuba, en octobre 1962, qui opposa John Kennedy à Nikita Khrouchtchev. Plus près de nous, en septembre 1983, le sort de l'humanité a également vacillé lorsque le dysfonctionnement de satellites espions soviétiques, trompés par la réflexion du Soleil sur des nuages d'altitude, a fait croire au tir de cinq missiles américains vers l'Union soviétique. Cette fausse alerte survint au pire moment, lorsque Ronald Reagan mettait la pression militaire sur son homologue Iouri Andropov en menaçant de déployer des missiles américains en Europe, et que l'Union soviétique venait d'abattre par erreur ou à dessein un avion de ligne au-dessus de son territoire – le vol Korean Air Lines 007 – avec à son bord nombre de ressortissants américains. Les deux présidents belliqueux avaient donc le doigt sur la gâchette.

Heureusement que cette nuit-là, le 26 septembre 1983, confronté aux signaux alarmants de son satellite, l'officier soviétique en charge de la surveillance du territoire, Stanislav Petrov, a conclu à une fausse alerte et n'en a pas averti ses supérieurs paranoïaques. S'il l'avait fait, l'Union soviétique aurait très bien pu tirer un barrage nourri de missiles nucléaires vers les États-Unis, déclenchant la Troisième Guerre mondiale.

La fragilité du système, et la menace pour l'humanité, c'est que la philosophie de la dissuasion nucléaire repose sur une posture de duel, main sur la crosse du colt, où il suffit d'un claquement de porte ou d'un rayon de soleil dans les yeux pour que les protagonistes dégainent. Une réverbération malencontreuse sur un nuage ou un microprocesseur d'ordinateur défaillant peut donc déclencher l'Armageddon. Certains experts estiment à 2 % *par an* la probabilité d'une telle guerre nucléaire accidentelle, c'est-àdire que celle-ci a de fortes chances de survenir au cours des prochaines décennies, si rien n'est fait pour désamorcer le système. Même un « petit » échange nucléaire entre l'Inde et le Pakistan, par exemple, éliminerait entre un milliard et deux milliards d'individus, non seulement directement, mais aussi à cause de la perturbation climatique mondiale et de l'effondrement de l'agriculture qui toucherait sans nul doute la Chine et les États-Unis.

Toutefois, comme dans le cas d'une guerre bactériologique, une guerre nucléaire même mondiale devrait épargner de petites populations excentrées, de sorte qu'au final, il semblerait que l'homme aura bien du mal à s'exterminer complètement, malgré toute sa bonne volonté. Mais s'il n'y parvient pas tout seul, ne pourrait-il pas mandater, ou du moins créer des auxiliaires qui seraient capables de le faire à sa place ?

Le surhomme contre l'homme

Il faut en effet se méfier de l'intelligence artificielle, couplée aux nouveaux moyens qu'offre la nanotechnologie. Cette dernière consiste à fabriquer de minuscules structures fonctionnelles, éventuellement capables de s'autoreproduire et de se disperser. Que se passerait-il si de telles structures étaient conçues par des esprits mal intentionnés ou échappaient simplement à notre contrôle, avec pour fonction de se dupliquer pour obscurcir le ciel, ravager les cultures comme des criquets, voire dévorer sans vergogne toute matière organique, homme compris ? C'est le concept du *gray goo*, cher aux auteurs de science-fiction. Et encore, il s'agit là d'un essaimage basique, certes destructeur, mais sans intelligence sophistiquée pour l'aider à évoluer et à résister à la contre-attaque de

www.frenchpdf.com

l'espèce humaine qui pourrait, on l'espère, neutraliser la menace.

Les choses se gâtent lorsqu'entre en scène l'intelligence artificielle. Notre société en pleine mutation a vu l'essor de l'ordinateur, sa vitesse d'exécution doublant tous les dix-huit mois. Cette envolée exponentielle signifie qu'à très court terme, l'homme sera dépassé dans le traitement des données et l'élaboration de stratégies (on le voit déjà au jeu de go ou aux échecs). Tant que la machine est asservie à son créateur, nul danger : au contraire, l'intelligence artificielle pourra nous servir à combattre la plupart des scénarios qui menacent notre civilisation.

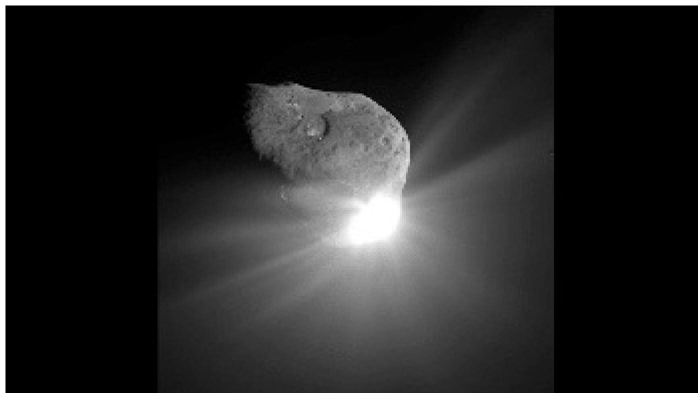
Mais qu'adviendrait-il si les machines, sans le moindre scrupule évidemment, déduisent qu'il serait judicieux d'éliminer de la scène ces bipèdes qui nuisent à leur efficacité, parasitent leurs ressources et les empêchent d'atteindre leurs limites optimales de développement ?

Le problème fut anticipé par l'auteur Arthur C. Clarke et le cinéaste Stanley Kubrick dans leur œuvre *2001 : l'odyssée de l'espace* (1968), où l'ordinateur d'un vaisseau spatial décide de supprimer l'équipage, car il le juge inapte à accomplir sa mission. Une intelligence artificielle pourrait ainsi se désolidariser du genre humain, par exemple en calculant que celui-ci mène la Terre à sa perte. La solution la plus logique ne consisterait-elle pas à éliminer le fautif, c'est-à-dire l'homme lui-même ?

Quand on sait que les grandes puissances développent déjà des robots tueurs pour remplacer les combattants en chair et en os sur les champs de bataille, et que la définition de l'ennemi à exterminer n'est qu'une question de paramètres à sélectionner dans le logiciel, cette éventualité est loin d'être absurde. C'est même, d'après le philosophe Nick Bostrom et ses coauteurs[4], l'un des scénarios les plus redoutables s'il est mis à exécution, car une intelligence artificielle n'abattra ses cartes qu'après avoir calculé que son action est imparable.

Surveiller les astéroïdes

Si l'humanité échappe à ses propres démons, reste encore la menace du cosmos. Comme nous l'avons vu au début de ce livre, le règne des mammifères et *in fine* de l'espèce humaine s'est ouvert sur un impact d'astéroïde qui a saccagé la biosphère et exterminé 75 % de toutes les espèces de l'époque, y compris les dinosaures qui verrouillaient jusque-là le cours de l'évolution.



L'interception d'un astéroïde menaçant fait partie aujourd'hui des parades envisagées pour protéger l'humanité des dangers du cosmos. Le 4 juillet 2005, un petit impact exploratoire fut ainsi accompli par la sonde Deep Impact sur la comète Tempel 1. (© NASA/JPL-Caltech/UMD.)

Il est donc envisageable qu'un autre impact d'astéroïde ou de comète referme le chapitre, exterminant de nouveau les grosses bêtes au sommet de la pyramide alimentaire, c'est-à-dire cette fois-ci les hommes.

On sait bien que c'est possible, puisque c'est déjà arrivé au moins une fois dans le passé[5]. La vraie question est de savoir si c'est *probable* au cours du règne de notre espèce. La réponse se résume donc à un calcul de probabilités, car la Terre sera frappée à l'avenir, et de nombreuses fois, par des projectiles petits et gros.

Plus les projectiles cosmiques sont gros, de taille à nous anéantir, et plus ils sont rares. Il a fallu un astéroïde de 10 kilomètres de taille pour déclencher l'extinction de la fin du Crétacé, et encore parce qu'il a frappé une cible géochimique particulièrement létale. Or au vu de la population d'astéroïdes qui nous croisent – les « géocroiseurs » – et en recoupant cette information par l'étude des cratères d'impact sur la Terre et la Lune, on estime qu'un tel impact exterminateur d'espèces a lieu sur Terre tous les 100 millions d'années en moyenne.

Il serait faux de croire que parce que le dernier impact du genre a eu lieu il y a 66 millions d'années, nous pouvons dormir sur nos deux oreilles encore 34 millions d'années durant. Il ne s'agit pas en effet d'un phénomène périodique, réglé par une horloge cosmique, mais d'un phénomène aléatoire exprimé par une probabilité. Or les

www.frenchpdf.com

joueurs de roulette le savent bien : ce n'est pas parce que le numéro zéro ne sort qu'une fois sur 37 – mauvais coup du sort lorsque tous les joueurs perdent leur mise – qu'une fois ce numéro sorti, ils ont 36 manches devant eux pour miser leur argent sans craindre le pire. Le zéro peut sortir deux ou trois fois de suite, si ça lui chante. À chaque lancer de la boule, il y a toujours la même chance sur 37 de tout perdre, la boule n'ayant aucun souvenir ni devoir envers le tour précédent.

Pour les astéroïdes, c'est pareil. La Terre peut être dévastée par un nouvel impact dans une centaine de millions d'années, comme elle peut l'être dans trois ans. Pour faire simple, chaque année, l'humanité a une chance sur 100 millions d'être anéantie par un impact cosmique. On peut se rassurer – c'est ironique – en notant qu'il est deux millions de fois plus probable que l'humanité soit anéantie par une guerre nucléaire accidentelle, dont on a vu que la probabilité annuelle est de l'ordre d'une chance sur 50.

La menace cosmique devient un peu plus tangible quand on réalise qu'il n'est pas nécessaire que l'astéroïde mesure 10 kilomètres de taille pour détruire l'espèce humaine, comme ce fut le cas autrefois pour les dinosaures. Il suffirait que le projectile extermine notre civilisation, au travers d'un hiver « nucléaire » détruisant notre agriculture, pour que notre espèce vacille et puisse ensuite succomber à des pandémies et autres agents collatéraux. Et pour cela, un astéroïde de deux kilomètres de taille seulement devrait faire l'affaire, calibre qui frappe la Terre 100 fois plus fréquemment : tous les millions d'années en moyenne. Si elle compte atteindre une durée de vie du même ordre, l'espèce humaine sera donc vraisemblablement confrontée à ce type de scénario.

Probable sur le long terme, la menace peut toutefois être déjouée. S'il y a un avantage que nous détenons sur nos malheureux prédécesseurs les dinosaures, c'est bien notre intelligence, couplée à notre technologie, qui nous permet de prévoir et de neutraliser une menace cosmique. C'est d'ailleurs une faculté toute nouvelle qu'il convient de saluer : il y a un demi-siècle à peine, nous n'avions encore aucune idée du potentiel létal des astéroïdes (on croyait encore que les cratères de la Lune étaient des volcans), ni les moyens de les détecter et de les combattre. Ironie du sort, ce sont aujourd'hui nos armes d'autodestruction – les missiles et les bombes nucléaires – qui peuvent détourner de leur trajectoire les astéroïdes menaçants. Le recensement de leur population par nos observatoires astronomiques est aujourd'hui en bonne voie, et aucun objet de calibre exterminateur n'est présentement sur une trajectoire de collision avec la Terre.

Si un objet menaçant faisait son apparition sur nos écrans dans les siècles ou les millénaires à venir, gageons que nous saurions y faire face et rendre le projectile hors d'état de nuire, en le détournant ou en le détruisant.

Mars : notre assurance tous risques

Notre défense planétaire viendrait-elle à faillir – que ce soit contre les pandémies, la guerre nucléaire ou les impacts d'astéroïdes – qu'il nous resterait encore un dernier rempart contre l'extinction : l'implantation de l'espèce humaine sur plusieurs planètes plutôt qu'une, concrétisant l'adage qu'il ne faut pas mettre tous ses œufs dans le même panier.

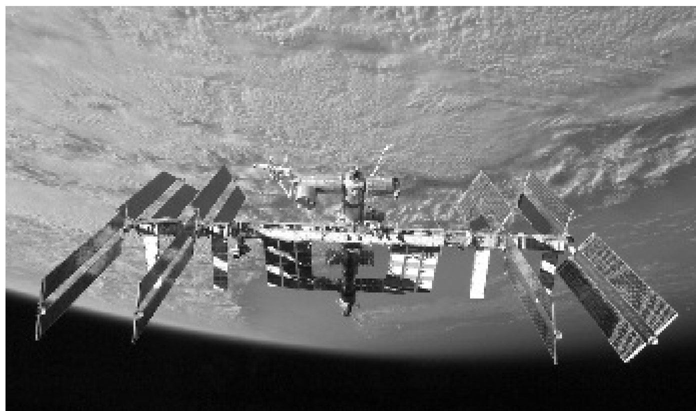
Née en Afrique, l'espèce humaine a essaimé sur tous les continents, poussée par la curiosité et la nécessité. Sa technologie lui permet désormais de franchir un pas supplémentaire en s'implantant sur la planète Mars : ce n'est qu'une question de temps.

À six mois de voyage de la Terre, plus petite que notre monde mais d'une surface équivalente à celle de tous nos continents réunis, la planète rouge possède un potentiel énorme en termes d'habitabilité : températures comparables à celles de l'Antarctique (– 60 °C en moyenne, mais jusqu'à + 20 °C au sol à l'équateur en début d'après-midi) ; atmosphère fine de dioxyde de carbone que l'on pourrait techniquement épaissir, avec en bonus le réchauffement qu'apporterait un effet de serre amplifié ; vastes réserves de glace d'eau aux deux pôles, équivalentes à un océan planétaire de 50 mètres de profondeur ; matières premières abondantes sur place pour la construction de bâtiments (argile, sable, plâtre) et pour une industrie basique (fer, carbone, silicium).

Mars ne doit toutefois pas être perçue comme une annexe de la Terre, qui servirait à absorber le trop-plein de notre population ou abriter celle-ci en cas de conflit nucléaire ou de dérèglement total de notre gestion planétaire. En effet, le transport spatial interplanétaire est économiquement rédhibitoire : le coût actuel d'un lancement vers Mars tourne autour de 50 000 dollars/euros *le kilogramme*. En comptant le coût de construction du vaisseau spatial lui-même et le tonnage nécessaire à la survie des passagers durant le vol, poser un équipage sur Mars reviendrait actuellement à plusieurs centaines de millions de dollars/euros par personne.

Dans ses projections les plus folles, en révolutionnant tous les aspects du voyage, le visionnaire américain Elon Musk, PDG de la société aérospatiale Space-X, espère un jour diviser les coûts par un facteur 100, voire 1 000, et proposer le voyage vers Mars pour seulement 500 000 dollars/euros par personne. Même à ce prix, s'implanter sur Mars restera donc une proposition coûteuse, réservée à une élite. Que l'humanité ne se leurre pas en pensant qu'elle pourrait simplement changer de planète si elle détruit la sienne.

www.frenchpdf.com



Quitter la Terre ? L'espèce humaine possède déjà, depuis l'an 2000, une colonie permanente d'astronautes à bord de la Station spatiale internationale. (© NASA.)

Toutefois, l'implantation sur Mars d'une petite colonie est techniquement envisageable. Si un premier débarquement sur la planète rouge, même provisoire, n'est pas encore au calendrier des grandes agences spatiales, celles-ci y pensent sérieusement, et une fois la décision prise, tout peut aller très vite : une décennie suffirait à monter le programme, en dépensant les mêmes sommes que pour la Station spatiale internationale, c'est-à-dire aux alentours de 100 milliards de dollars/euros.

Derrière cette tête de pont, des visionnaires comme Elon Musk et l'ingénieur Robert Zubrin militent pour l'établissement rapide d'une colonie permanente sur la planète rouge, tirant avantage des ressources martiennes. C'est d'ailleurs la raison qui a motivé Elon Musk en premier lieu à fonder sa société aérospatiale Space-X : faire d'*Homo sapiens* une espèce interplanétaire qui ne serait plus dépendante de la civilisation terrestre et de ses erreurs potentielles.

On peut spéculer sur la taille minimale que devrait avoir cette colonie martienne pour donner naissance à une branche génétiquement « saine » de la civilisation humaine. Nombre de chercheurs se sont penchés sur le problème et le consensus qui se dégage est qu'il faudrait une population initiale de 150 à 200 individus pour perpétuer une colonie sans danger de dégradation du pool génétique par consanguinité. En regardant plus loin, une population initiale de 500 à 1 000 individus serait souhaitable pour compenser la « dérive génétique » – la diminution du nombre de variantes d'un gène, qui mène à une perte de diversité de l'espèce – par un taux adéquat de mutations génétiques qui maintiendraient cette diversité. Un tel équilibre garderait la population flexible et adaptable, face à d'éventuelles pressions évolutives6.

Une dérive génétique réduisant la diversité de la colonie martienne n'est d'ailleurs pas entièrement négative : elle pourrait mener à un renforcement de certains traits et à la naissance d'une sous-espèce distincte de la branche terrestre, comme le souligne Chris Impey, astronome à l'université de l'Arizona. Les conditions martiennes pourraient ainsi introduire des traits nouveaux, par exemple la faible pesanteur (0,38 *g*, soit le tiers de la pesanteur terrestre) qui influera sur la masse musculaire, la charpente osseuse et le système cardiovasculaire, changements qui pourront être « officialisés » par des mutations favorables et perpétués par reproduction.

En combien de temps atteindra-t-on sur Mars une espèce suffisamment éloignée d'*Homo sapiens* pour qu'elle se sépare de notre branche terrestre de façon irréversible ? Nul ne peut encore le dire, mais c'est une solution tout à fait recevable dans notre questionnement sur le sort du genre humain. Quoi qu'il en soit, avec une colonie martienne, la disparition éventuelle de la souche « mère » de notre espèce restée sur Terre ne constituera pas nécessairement la fin du genre humain.

Le silence du cosmos

Un *happy end* ? Comme nous en sommes aux pures spéculations, en voici une autre, un peu moins optimiste.

Partons du principe que sur sa lancée, après la colonisation de Mars, notre *Homo astronauticus* voguera d'étoile en étoile pour explorer et exploiter de nouveaux mondes, motivé par la curiosité et la nécessité. Certains penseurs ont même imaginé qu'une telle propagation galactique d'une espèce intelligente et technologique est probable, voire inévitable. Mais cette supposition débouche sur un troublant corollaire : vu le nombre pratiquement infini de planètes dans la Galaxie – vraisemblablement plusieurs centaines de milliards – et même en assignant à l'émergence de la vie, puis de l'intelligence sur ces autres planètes une probabilité extrêmement faible, la Galaxie aurait déjà dû être entièrement explorée et colonisée par des civilisations antérieures à la nôtre : or nous n'en voyons aucune trace.

www.frenchpdf.com

C'est la réflexion à laquelle s'est livré dès 1950 le physicien italo-américain Enrico Fermi, pionnier du réacteur nucléaire et de la bombe atomique, en lançant à ses amis et collaborateurs du laboratoire de Los Alamos, lors d'un déjeuner dans la cafétéria, la boutade : « Mais où est tout le monde ? » (*Where is everybody ?*). Sur la base de quelques estimations rapides, il conclut en effet qu'avec le temps d'avance dont ont disposé d'autres civilisations avant la nôtre (la Galaxie est deux fois plus âgée que la Terre), elles auraient déjà dû atteindre notre planète. Qu'elles ne soient pas encore arrivées chez nous constitue ce qu'on appelle désormais le paradoxe de Fermi.

Ce n'est bien sûr un paradoxe que si l'on pose au départ des hypothèses très subjectives, à savoir que la vie naît assez systématiquement sur des planètes offrant les bonnes conditions ; que l'évolution débouche assez systématiquement sur l'intelligence et la technologie ; et que de telles civilisations trouvent utile ou judicieux de quitter leur berceau et voyager à travers la Galaxie, ou au minimum de signaler leur présence par ondes radio ou autres fréquences électromagnétiques.

Jongler avec toutes ces hypothèses et y assigner des probabilités se résume d'ailleurs à une formule appelée équation de Drake, d'après le radioastronome américain qui l'a énoncée en 1961. C'est d'ailleurs plus une mesure de notre ignorance que de notre savoir : j'en ai donné une description et quelques solutions dans un précédent ouvrage7. Or elle peut avoir quelque chose à dire sur le destin de l'espèce humaine et notamment sur sa durée de vie.

Si dans le sous-ensemble des planètes aux conditions favorables (abritant des océans), on assigne à la probabilité d'émergence de la vie et de l'intelligence des valeurs conservatrices, faibles mais non nulles (de l'ordre de 1 % à 0,01 % chacune), le facteur clé qui expliquerait notre détection ou non d'intelligences extraterrestres se résumerait à leur *durée d'existence*. Le fait qu'aujourd'hui nous n'en détectons pas – le silence glacial du cosmos – signifierait qu'une civilisation comme la nôtre disparaît en un laps de temps relativement court, de l'ordre de quelques siècles à quelques centaines de milliers d'années. Tout en se manifestant *à leur époque*, tout au long de l'histoire de la Galaxie, leur brève durée de vie fait qu'aucune civilisation ne recoupe temporellement la nôtre. À tout instant donné il n'existe qu'une seule civilisation technologique dans la Galaxie, et aujourd'hui ce serait nous.

Cet exercice de pensée insinue que des civilisations technologiques ne sauraient durer des millions ou des dizaines de millions d'années. On peut se rassurer en notant que l'hypothèse haute, quelques centaines de milliers d'années d'existence pour une espèce intelligente comme la nôtre, ce n'est déjà pas si mal : personnellement je signerais tout de suite.

On peut aussi conclure qu'on a surestimé les autres facteurs, et que l'émergence de la vie, la diversité biologique qui mène à l'intelligence et l'intelligence elle-même sont des phénomènes rarissimes dans l'Univers et donc infiniment précieux. Et que préserver l'espèce humaine, et la biodiversité qui l'accompagne, n'est pas seulement une option souhaitable pour nous : ce serait aussi élégant et respectueux envers le cosmos qui s'est donné bien du mal pour en arriver là. Redoublons donc de précautions et de vigilance, et cultivons intelligemment notre jardin.

1.

Lorsque l'atmosphère se refroidit, l'eau de surface d'un lac en fait de même. Se contractant et devenant plus dense, elle sombre vers le fond, déplaçant les eaux profondes qui au contraire remontent.

2.

La théorie d'une pandémie pour expliquer l'extinction des dinosaures fut notamment soutenue par le paléontologue américain Robert Bakker dans les années 1980.

3.

Le nom de « grippe espagnole » provient du fait que la maladie ne fut rapportée que par les journaux ibériques durant la Première Guerre mondiale, car l'Espagne était neutre dans le conflit et non frappée par la censure de guerre, alors que France, Allemagne et leurs alliés belligérants passèrent l'épidémie sous silence pour ne pas épouvanter leurs armées déjà mises à rude épreuve.

4.

Nick Bolstrom est directeur à l'université d'Oxford de l'Institut sur l'avenir de l'humanité (Future of Humanity Institute). Cet institut fait partie du Global Challenges Foundation qui a notamment publié le rapport « 12 risks that threaten human civilization » (PAMLIN D., ARMSTRONG S. *et al.*).

5.

Une fois *au moins*, en effet. D'autres crises plus anciennes du monde vivant, notamment à la fin du Dévonien, ont également pu être causées par des impacts.

www.frenchpdf.com

6.

Si un tel nombre d'individus (500 à 1 000) semble nécessaire pour fonder une colonie martienne, une stratégie alternative consisterait à fonder la colonie avec seulement deux ou trois femmes : elles assureraient la descendance à partir d'une banque du sperme assurant la variabilité génétique. N'en déplaise aux misogynes, aucun homme ne serait donc nécessaire sur place pour fonder une colonie.

7.

La Vie sur Mars, Seuil, « Science ouverte », 1999.

www.frenchpdf.com

Bibliographie

Livres

BUFFETAUT, E., *Sommes-nous tous voués à disparaître ? Idées reçues sur l'extinction des espèces*, Paris, Le Cavalier Bleu, 2012.

DEVICTOR, V., *Nature en crise. Penser la biodiversité*, Paris, Seuil, « Anthropocène », 2015.

DUBOIS, P., *Vers l'ultime extinction ? La biodiversité en danger*, Paris, La Martinière, 2004.

FRANKEL, C., *Quatre milliards d'années d'histoire de la Terre*, Paris, De Vecchi, 1980.

FRANKEL, C., *La Mort des dinosaures. L'hypothèse cosmique*, Paris, Masson, 1993 ; Paris, Seuil, « Points Sciences », 1999.

GRIMOULT, C., *Histoire des théories scientifiques de l'extinction des espèces*, Paris, Ellipses, 2014.

HUET, S., *L'Imposteur, c'est lui. Réponse à Claude Allègre*, Paris, Stock, 2011.

JOUZEL, J. et DEBROISE, A., *Le Climat. Jeu dangereux*, Paris, Dunod, 2007.

KOLBERT, E., *La 6e Extinction, comment l'homme détruit la vie*, Paris, Vuibert, 2015.

SEMAL, L., *Bestiaire disparu. Histoire de la dernière grande extinction*, Toulouse, Plume de carotte, 2013.

Articles de recherche

ALLENTOFT M. E. *et al.*, « Extinct New Zealand megafauna were not in decline before human colonization », *Proceed. Natl. Acad. of Sci.*, 111, 2014, p. 4922-4927.

ALVAREZ L. *et al.*, « Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction », *Science*, 208, 1980, p. 1095-1108.

ARMSTONG, S. et PAMLIN, D. (éd.), « 12 risks that threaten human civilization », Oxford, Future of Humanity Institute, 2015.

BARNOSKY A. D. *et al.*, « Assessing the causes of Late Pleistocene extinctions on the continents », *Science*, 306, 2004, p. 70-75.

BARNOSKY A. D. *et al.*, « Has the Earth's sixth mass extinction already arrived ? », *Nature*, 471, 2011, p. 51-57.

BAUER A. M. et RUSSELL A. P., « *Hoplodactylus delcourti* n. sp. (Reptilia : Gekkonidae), the largest known gecko », *New Zealand Journal of Zoology*, 13, 1986, p. 141-148.

BECKAGE B. *et al.*, « A rapid upward shift of a forest ecotone during 40 years of warming in the Green Mountains of Vermont », *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 105, 2008, p. 4197-4202.

BLACKWELL M., « The fungi : 1, 2, 3… 5.1 million species ? », *American Journal of Botany*, 98, 2011, p. 426-438.

BOSTROM N., « Existential risk : Analyzing human extinction scenarios and related hazards », *Journal of Evolution and Technology*, 9, 2002.

BOYLES J. G. *et al.*, « Economic importance of bats in agriculture », *Science*, 332, 2011, p. 41-42.

BRANDO P. *et al.*, « Abrupt increases in Amazonian tree mortality due to drought-fire interactions », *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 111, 2014, p. 6346-6252.

BROOKS T. M., PIMM S. L. et COLLAR N. J., « Deforestation predicts the number of threatened birds in insular Southeast Asia », *Conservation Biology*, 11, 1997, p. 382-394.

BRUNET M. *et al.*, « A new hominid from the Upper Miocene of Chad, Central Africa », *Nature*, 418, 2002, p. 145-151.

BUTCHART S. H. M. *et al* ., « Global biodiversity : Indicators of recent declines », *Science*, 328, 2010, p. 1164-1168.

www.frenchpdf.com

CARPENTER K. E. *et al.*, « One-third of reef-building corals face elevated extinction risk from climate change and local impacts », *Science*, 321, 2008, p. 560-563.

CEBALLOS G. et EHRLICH P. R., « Mammal population losses and the extinction crisis », *Science*, 296, 2002, p. 904-907.

CHAPRON G. *et al.*, « Recovery of large carnivores in Europe's modern human-dominated landscapes », *Science*, 346, 2014, p. 1517-1519.

COLLEN B. *et al.*, « Spineless : Status and trends of the world's invertebrates », Zoological Society of London, Londres, 2012.

COSEPAC, « Évaluation et rapport de situation du COSEPAC sur la morue franche (*Gadus morhua*) au Canada », Ottawa, 2010.

COSTELLO M. J., MAY R. M. et STORK N. E., « Can we name Earth's species before they go extinct ? », *Science*, 339, 2013, p. 413-416.

COURTILLOT V. *et al.*, « Deccan flood basalts at the Cretaceous/Tertiary boundary ? », *Earth and Planetary Science Letters*, 80, 1986, p. 361-374.

DIMAGGIO E. *et al.*, « Late Pliocene fossiliferous sedimentary record and the environmental context of early Homo from Afar, Ethiopia », *Science*, 347, 2015, p. 1355-1359.

DIRZO R. *et al.*, « Defaunation in the Anthropocene », *Science*, 345, 2014, p. 401-406.

DUNCAN R. P., BOYER A. G. et BLACKBURN T. M., « Magnitude and variation of prehistoric bird extinctions in the Pacific », *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 110, 2013, p. 6436-6441.

ELIAS S. A. et SCHREVE D. C., « Late Pleistocene megafaunal extinctions », *in* ELIAS S. A. (éd.), *Encyclopedia of Quaternary Science*, Amsterdam, Elsevier Science Publishers, 4, 2007, p. 3202-3217.

FAITH J. T., « Late Pleistocene and Holocene mammal extinctions on continental Africa », *Earth-Science Reviews*, 128, 2014, p. 105-121.

FIRESTONE R. B. *et al.*, « Evidence for an extraterrestrial impact 12,900 years ago that contributed to the megafaunal extinctions and the Younger Dryas cooling », *PNAS*, 104, 2007, p. 16016-16021.

FRANKEL C., « Pas de deuxième impact tueur de dinosaures », *Ciel et Espace*, 477, 2010, p. 36-39.

GIBSON L. *et al.*, « Near-complete extinction of native small mammal fauna 25 years after forest fragmentation », *Science*, 341, 2013, p. 1508-1510.

GILL J. *et al.*, « Pleistocene megafaunal collapse, novel plant communities, and enhanced fire regimes in North America », *Science*, 326, 2009, p. 1100-1103.

GREEN R. E. *et al.*, « A draft sequence of the Neandertal genome », *Science*, 328, 2010, p. 710-722.

HAYNES G., « A review of some attacks on the overkill hypothesis, with special attention to misrepresentation and doubletalk », *Quaternary International*, 169-170, 2006, p. 84-94.

HENNIGE S., ROBERTS J. M. et WILLIAMSON P. (éd.) (Secretariat of the Convention on Biological Diversity), « An updated Synthesis of the impacts of ocean acidification on marine biodiversity », Montréal, Technical Series, 75, 2014.

HILDEBRAND A. R. *et al.*, « Chicxulub crater : A possible Cretaceous-Tertiary boundary impact crater on the Yucatan Peninsula, Mexico », *Geology*, 19, 1991, p. 867-871.

HOFFMAN M. *et al.*, « The Impact of conservation on the status of the world's vertebrates », *Science*, 330, 2010, p. 1503-1509.

JOHNSON C. N., « Determinants of loss of mammal species during the Late Quaternary "megafauna" extinctions : Life history and ecology, but not body size », *Proc. R. Soc. Lond. B*, 269, 2002, p. 2221-2227.

KENNET J. P. et STOTT L. D., « Abrupt deep-sea warming, palaeoceanographic changes and benthic extinctions at the end of the Palaeocene », *Nature*, 353, 1991, p. 225-229.

KERR R. A., « Ocean acidification unprecedented, unsettling », *Science*, 328, 2010, p. 1500-1501.

KHATIWALA S., PRIMEAU F. et HALL T., « Reconstruction of the history of anthropogenic CO_2 concentrations in the ocean », *Nature*, 462, 2009, p. 346-349.

www.frenchpdf.com

KOCH P. L. et BARNOSKY D., « Late Quaternary extinctions : State of the debate », *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, 37, 2006, p. 215-250.

KROSS S. M., TYLIANAKIS J. M. et NELSON X. J., « Effects of introducing threatened falcons into vineyards on abundance of passeriforms and bird damage to grapes », *Conservation Biology*, 26, 2011, p. 142-149.

LOARIE S. R. *et al.*, « The velocity of climate change », *Nature*, 462, 2009, p. 1052-1055.

LOPES DOS SANTOS R. A. *et al.*, « Abrupt vegetation change after the Late Quaternary megafaunal extinction in southeastern Australia », *Nature Geoscience*, 6, 2013, p. 627-631.

MACLEAN I. M. D. et WILSON R. J., « Recent ecological responses to climate change support predictions of high extinction risk », *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 108, 2011, p. 12337-12342.

MARTIN P., « 40,000 years of extinctions on the "planet of doom" », *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 82, 1990, p. 187-201.

MACPHEE R. D. E., ITURRALDE-VINENT M. A. et JIMÉNEZ VÁZQUEZ O., « Prehistoric sloth extinctions in Cuba : Implications of a new "last" appearance date », *Caribbean Journal of Science*, 43, 2007, p. 94-98.

MCCAULEY D. J. *et al.*, « Marine defaunation : Animal loss in the global ocean », *Science*, 347, DOI: 10.1126/science. 1255641, 2015.

MCLAREN D. J. et GOODFELLOW W. D., « Geological and biological consequences of giant impacts », *Annu. Rev. Earth Planet Sci.*, 18, 1990, p. 123-171.

MCINERNEY F. et WING S. L., « The Paleocene-Eocene Thermal Maximum : A perturbation of carbon cycle, climate, and biosphere with implications for the future », *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 39, 2011, p. 489-516.

MEIER K. J. S. *et al.*, « The role of ocean acidification in *Emiliana huxleyi* coccolith thinning in the Mediterranean Sea », *Biogeosciences*, 11, 2014, p. 2857-2869.

MORA C. *et al.*, « How many species are there on Earth and in the Ocean ? », *PLOS Biology*, 9 (8), 2011, e1001127.

MORITZ C. *et al.*, « Impact of a century of climate change on small-mammal communities in Yosemite Natural Park, USA », *Science*, 322, 2008, p. 261-264.

MYERS R. A. et WORM B., « Rapid worldwide depletion of predatory fish communities », *Nature*, 423, 2003, p. 280-283.

OLIVIERA L. J. C. *et al.*, « Large-scale expansion of agriculture in Amazonia may be a no-win scenario », *Environ. Res. Lett.*, 8, 2013, 024021.

PARMESAN C. et YOHE G., « A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems », *Nature*, 421, 2003, p. 37-42.

PEREIRA H. M. *et al.*, « Scenarios for global biodiversity in the 21st century », *Science*, 330, 2010, p. 1496-1501.

PETERS C. M., GENTRY A. H. et MENDELSOHN R. O., « Valuation of an Amazonian rainforest », *Nature*, 339, 1989, p. 655-656.

PIMM S. L. *et al.*, « Human impacts on the rates of past, present, and future bird extinctions », *Proceed. Natl. Acad. Sci. USA*, 103, 2006, p. 10941-10946.

PIMM S. L. *et al.*, « The biodiversity of species and their rates of extinction, distribution, and protection », *Science*, 344, 2014, 1246752.

POUNDS J. A., FOGDEN M. P. L. et CAMPBELL J. H., « Biological response to climate change on a tropical mountain », *Nature*, 398, 1999, p. 611-614.

PROTHERO D. R., « The Late Eocene-Oligocene extinctions », *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 22, 1994, p. 145-165.

RAUP D. M. et SEPKOSKI J. J., « Mass extinctions in the marine fossil record », *Science*, 215, 1982, p. 1501-1503.

RENNE P. *et al.*, « State shift in Deccan volcanism at the Cretaceous-Paleogene boundary, possibly induced by an impact », *Science*, 339, 2015, p. 684-687.

ROOT T. L. *et al.*, « Fingerprints of global warming on wild animals and plants », *Nature*, 421, 2003, p. 57-60.

www.frenchpdf.com

Roberts R. G. *et al.*, « New ages for the last Australian megagauna : Continent-wide extinction about 46,000 years ago », *Science*, 292, 2001, p. 1888-1892.

Rule S. *et al.*, « The Aftermath of megafaunal extinction : Ecosystem transformation in Pleistocene Australia », *Science*, 335, 2012, p. 1483-1486.

Sala O. E. *et al.*, « Global biodiversity scenarios for the year 2100 », *Science*, 287, 2000, p. 1770-1774.

Sanchez G. *et al.*, « Human (Clovis)-gomphothere (*Cuvieronius sp.*) association ~13,390 calibrated yBP in Sonora, Mexico », *PNAS*, 111, 2014, p. 10972-10977.

Sandom C. *et al.*, « Global late Quaternary megafauna extinctions linked to humans, not climate change », *Proc. R. Soc. B.*, 281, 2014, p. 20133254.

Schipper J. *et al.*, « The Status of the world's land and marine mammals : Diversity, threat and knowledge », *Science*, 322, 2008, p. 225-230.

Schulte P. *et al.*, « The Chicxulub asteroid impact and mass extinction at the Cretaceous-Paleocene boundary », *Science*, 327, 2010, p. 1214-1218.

Seddon P. J. *et al.*, « Reversing defaunation : Restoring species in a changing world », *Science*, 345, 2014, p. 406-412.

Sheehan P. M. et Hansen T. A., « Detritus feeding as a buffer to extinction at the end of the Cretaceous », *Geology*, 14, 1986, p. 868-870.

Smith F., Elliott S. M. et Lyons K., « Methane emissions from extinct megafauna », *Nature Geoscience*, 3, 2010, p. 374-375.

Steadman D. W. *et al.*, « Asynchronous extinction of late Quaternary sloths on continents and islands », *Proceed. Natl. Acad. Sci. USA*, 102, 2005, p. 11763-11768.

Stuart S. N. *et al.*, « Status and trends of amphibian declines and extinctions worldwide », *Science*, 306, 2004, p. 1783-1786.

Surovell T. A. *et al.*, « An independent evaluation of the Younger Dryas extraterrestrial impact hypothesis », *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 106, 2009, p. 18155-18158.

Swischer C. C. III *et al.*, « Coeval 40Ar/39Ar ages of 65.0 million years ago from Chicxulub Crater melt rock and Cretaceous-Tertiary boundary tektites », *Science*, 257, 1992, p. 954-958.

Thomas C. D. *et al.*, « Extinction risk from climate change », *Nature*, 427, 2004, p. 145-148.

Tilman D. *et al.*, « Habitat destruction and the extinction debt », *Nature*, 371, 1994, p. 65-66.

Toon O. B. *et al.*, « Environmental perturbations caused by the impacts of asteroids and comets », *Reviews of Geophysics*, 35, 1997, p. 41-78.

Vieilledent G. *et al.*, « Vulnerability of baobab species to climate change and effectiveness of the protected area network in Madagascar : towards new conservation priorities », *Biological Conservation*, 166, 2013, p. 11-22.

Villmoare B. *et al.*, « Early *Homo* at 2.8 Ma from Ledi-Geraru, Afar, Ethiopia », *Science*, 347, 2015, p. 1352-1355.

Walther G.-R. *et al.*, « Ecological response to recent climate change », *Nature*, 416, 2002, p. 389-395.

Wang S. et Dodson P., « Estimating the diversity of dinosaurs », *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 103, 2006, p. 13601-13605.

www.frenchpdf.com

Index

A

abeille, 1, 2, 3, 4-5 ; (et économie), 6-7

acide carbonique, 1-2

acide nitrique, 1

acide sulfurique (pluie acide), 1, 2, 3

acidification de l'océan, *voir océan*

Adansonia, voir baobab

Adhémar, Joseph, 1

Aepyornis, 1

Afars (triangle des), 1

Afrique (extinctions en), 1-2, 3, 4, 5, 6-7, 8, 9

Afrique de l'Est, 1, 2-3, 4-5, 6, 7

âge glaciaire, 1, 2, 3, 4, 5, 6-7

agriculture, 1, 2-3

aigle de Haast, 1

alimentation (comme facteur d'extinction), 1-2, 3, 4

Allègre, Claude, 1-2

Allentoft, Morten, 1

Alvarez, Luis, 1-2, 3, 4, 5

Alvarez, Walter, 1-2, 3, 4

Amazonie, *voir forêt amazonienne*

Ambrose, Stanley, 1

améive de Guadeloupe, 1

Amérique du Nord (extinctions en), 1, 2-3, 4, 5, 6, 7

Amérique du Sud (extinctions en), 1, 2, 3-4, 5

ammonite (extinction), 1

amphibien (extinction) 1, 2, 3, 4-5, 6-7, 8-9, 10, 11, 12-13, 14-15 ; (recensement), 16, 17

Ancylotherium, 1

Andropov, Iouri, 1

anémone, 1

Antarctique, 1-2, *3* , 4-5, 6, 7, 8, 9

Antilles, 1, 2-3, 4

www.frenchpdf.com

antilope, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8-9, 10

Apis mellifera, voir abeille

Appleman (lac, site), 1

Aptornis, 1

arachnide, araignée, 1, 2, 3

arbre, 1, 2, 3, 4-5, 6, 7, 8-9, 10 ; (migration) 11-12, 13 ; (du dragon), 14 ; (phylogénique), 15, 16, 17, 18

archée, archéobactérie, 1

Arctique (et changement climatique), 1, 2-3, 4

argile KT, *voir KT (couche)*,

Arrhenius, Svante, 1

arthropode, 1

artiodactyle (ongulé), 1

Asaro, Frank, 1-2, 3

astéroïde (impact d'), 1, 2, 3-4, 5-6, 7, 8, 9, 10-11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18-19, 20-21

Atelopus, 1

aurochs, *1* , 2-3

Australie (extinctions en), 1-2, 3, 4-5, 6, 7, 8, 9

australopithèque, *1* , 2-3, 4

Azurina eupalama, 1

B

bactérie, 1-2, 3, 4, 5, 6-7

baiji (dauphin), 1

Bakker, Robert, 1

banteng, 1

baobab, 1, 2- 3

bar, 1

Barnosky, Anthony, 1-2

Bassaricyon neblina, voir olinguito

Beckage, Brian, 1

Behrensmeyer, Anna, 1

Bighorn Basin, 1

biodiversité, 1-2, 3, 4-5, 6, 7, 8, 9-10, 11, 12-13, 14, 15-16, 17, 18

bipédie (naissance de la), 1-2

bison, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 ; (indien), 8

bivalve, 1, 2, 3, 4-5

www.frenchpdf.com

Blackburn, Tim, 1

Bobe, René, 1

bondelle, 1

Bos (*gaurus*, *javanicus*), 1 ; (*primigenius*), *voir aurochs*

Bostrom, Nick, 1

bouquetin des Pyrénées (extinction, résurrection de l'), *1* , 2

Boyer, Alison, 1

braconnage, 1, 2, 3, 4

Brando, Paulo, 1

Brazos River (site KT), 1

brèche d'impact, 1

brontothère, 1

Brunet, Michel, 1

Bufo periglenes, *voir crapaud doré*

Bulbophyllum nocturnum, 1

Byars, Carlos, 1-2

C

Camargo, Antonio, 1-2

Cambrien (explosion du), 1

carbonate, 1, 2-3

carbone (isotopes du), 1, 2-3, 4, 5, *et voir dioxyde de carbone*

carburant fossile, 1, 2, 3-4

catastrophisme, 1, 2

cercopithèque (*Cercopithecus lomaniensis*), 1

cenotes, 1, 2

céphalophe de Walter, 1

cerf (géant), *voir* Megaloceros

Cénozoïque, 1, *2* , 3, 4, 5

champignon, 1, 2-3, 4, 5

champignon parasite, 1, 2, 3, 4-5, 6, 7

Changis-sur-Marne (éléphant de), 1

chaîne alimentaire (effondrement de la), 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7

Chapron, Guillaume, 1

charbon, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7-8, 9

chasse (et faune, mégafaune), 1, 2, 3, 4-5, 6, 7-8, 9-10, 11-12, 13-14, 15-16, 17-18, 19, 20-21, 22, 23, 24-25, 26, 27, 28, 29, 30-31, 32, 33, 34, 35, 36, 37

www.frenchpdf.com

châtaignier, 1-2

chauve-souris, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7-8

Chauvet (grotte), 1, 2

Chelonoidis abingdonii, 1

Chesapeake Bay (cratère de), 1-2, 3

Chicxulub (cratère de), 1, 2-3, 4, 5, 6, 7-8, 9, 10

chimpanzé, 1, 2

Chine (contrebande vers la), 1

chiroptère, 1

Chondroclaria lyra, 1

chordé, 1

chromiste, 1, 2

chytride, 1

cichlidé, 1

circulation océanique (et climat), 1, 2

civilisation (effondrement de la), 1, 2, 3, 4, 5

Claeys, Philippe, 1

Clarke, Arthur C., 1

classe, 1, *2* , 3, 4, 5, 6, 7, 8-9, 10, 11, 12

clathrate, 1-2

clef de voûte (espèce –), 1

climat, *voir réchauffement climatique*

clonage, 1-2

Clovis (culture), 1-2

cœlacanthe, 1

collectionneur (facteur d'extinction), 1-2

Collen, Ben, 1

comète, *voir impact*

COP 1, 2

Coppens, Yves, 1-2

corail, 1, 2, 3, 4-5, 6-7 ; (blanchiment du), 8

corégone, 1

Cornu, Cyrille, 1

corridor écologique, 1, 2, 3

couche KT, *voir KT (couche)*

www.frenchpdf.com

Courtillot, Vincent, 1, 2, 3-4

crapaud doré, 1

cratère d'impact (KT), 1, 2-3, 4-5, 6-7

Crétacé (crise de la fin du), 1, 2-3, 4, 5-6, *7* , 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15

crevette, 1-2

criquet des Rocheuses, 1-2, 3

crocodile, 1, 2, 3

croissance (économique), 1-2

Crurifarcimen vagans, 1

crustacé, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9

Cuba, *1* , 2 ; (crise des missiles de), 3

Cuvier, George, 1

Cuvieronius, 1

cycadale, 1, 2

Cyprinodon inmemoriam, 1

D

danger (liste des espèces en), 1, *2* , 3-4, 5-6, 7, 8-9, 10, 11, 12, 13

danger critique (liste des espèces en), *1* , 2-3

Darwin, Charles, 1

dauphin, 1, 2, 3, 4, 5 ; – baiji du Yangzi, 6, 7 ; – Maui, 8

Deccan (trapps du), 1-2, 3, 4, 5, 6, 7

déclin d'une population, *voir population*

déclin « énigmatique », 1, 2

décroissance, 1-2

déforestation, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, *8* , 9-10, 11, 12, 13, 14

Deinotherium, 1

Delcourt, Alain, 1-2

densité de population, voir population

destruction de l'habitat, voir habitat

déluge biblique, 1-2, 3, 4

développement durable, 1-2, 3, 4

Dévonien (crise de la fin du), 1, *2* , 3, 4

dinosaure (extinction), 1-2, 3, 4-5, *6* , 7-8, 9, 10, 11, 12, 13, *14* , 15, 16-17, 18, 19, 20, 21

dioxyde de carbone, 1, 2, 3, 4-5, *6* , 7-8, 9-10, 11-12, 13, 14, 15

dioxyde de soufre, 1, 2-3

www.frenchpdf.com

Diprotodon, 1

Dirzo, Rodolfo, 1

dodo, 1, 2, 3-4, 5

Dracaena kaweesakii, 1

Drake, Charles (équation de), 1

Dryas récent (coup de froid du), 1, 2, 3, 4-5, 6

Duncan, Richard, 1

E

East Side Story, 1

eau douce (écosystème d'), 1-2, 3-4, 5, 6

économie (et extinctions, réchauffement), 1, 2, 3, 4, 5, 6-7, 8-9, 10, 11-12, 13

écrevisse, 1

Ectodemia castaneae, 1

Ectopistes migratorius, voir pigeon migrateur

écureuil, 1 ; (de Belding), 2

Edwardsiella andrillae, 1

effet amplificateur, 1, 2, 3, 4, 5

effet de cible (impact cosmique), 1, 2, 3, 4, 5-6, 7

effet de serre, 1, 2-3, 4, 5, 6-7, 8-9, 10, 11

effet de seuil, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8

effet en chaîne, 1, 2

effet rotissoire (impact cosmique), 1, 2

effondrement (de stock, de population), 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9-10, *11* , 12, 13, 14, 15, 16-17, *18* , 19-20, *21* , 22, 23, 24

Ehrlich, Paul, 1

El Kef (site KT), 1, 2

El Mimbral (site KT), 1

El Peñon (site KT), 1

éléphant, 1, 2, 3-4, 5-6, 7, 8, 9-10, *11* , 12, 13, 14

Elephas antiquus, 1

El fin del Mundo (site), 1-2, *3*

embranchement, 1, 2, 3-4

empire, 1

énergie renouvelable, 1

enveloppe climatique (d'une espèce), 1-2, 3, 4

www.frenchpdf.com

Éocène, *1* , 2-3

Éocène/Oligocène (crise), *1* , 2-3, 4, 5, 6

éponge, 1, 2, 3

éruption, *voir volcan*

Esmark, Jens, 1

escargot, 1-2, 3 ; (bagué d'Aldabra), 4

espèce (définition), 1-2, 3 ; (durée de vie), 4-5, 6 ; (invasive), 7-8, 9 ; (marine), 10-11, 12, 13-14 ; (menacées), 15-16, 17, 18-19, 20-21, 22-23 ; (nombre), 24-25, 26, 27, 28-29, 30, 31-32, 33, 34, 35, 36-37

Éthiopie (trapps d'), 1, 2, 3

eucaryote, 1

Eurasie, Europe (extinctions en), 1, 2-3, 4, 5-6, 7, 8, 9, 10

excentricité (de l'orbite terrestre), *1* , 2-3

extinction (concept), 1, 2-3 ; (de masse), 4-5, *6* ; (écologique), 7-8 ; (taux naturel d'), 9-10

extraterrestre (civilisation), 1-2

F

Faith, J. Tyler, 1

famille, *1* , 2-3, 4, 5, 6, 7-8, 9, 10, 11, 12, 13

faucon (de Nouvelle-Zélande), 1-2

féra, 1

Fermi, Enrico (paradoxe de), 1

feu de brousse, de forêt, 1, 2, 3, 4, *5* , 6, 7, 8, 9, 10, 11-12

Firestone, Richard, 1

Folsom (culture), 1

Font-de-Gaume (grotte du), 1, 2

forêt (feu de), *voir feu*

forêt amazonienne, 1-2, 3-4, 5, 6 ; de nuage 7 ; du Vermont, 8-9

fossile, 1-2, 3-4, 5, 6, 7-8, 9, 10-11, 12, 13-14, 15-16, 17-18, 19, 20, 21-22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32

fossile (genèse d'un), 1

fourmi, 1, 2, 3

fragmentation de l'habitat, *voir habitat*

G

Gadus morhua, *voir morue*

Gaïa (hypothèse), 1

Galápagos (îles), 1, 2, 3

Galaxie (intelligences dans la), 1, 2-3

www.frenchpdf.com

gastéropode, 1, 2, 3

Gastornis, 1, *2*

gaz carbonique, *voir dioxyde de carbone*

gecko géant, *voir* kawekaweau

genre, *1* , 2-3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16

genre humain, 1, 2, 3-4, 5, 6-7, 8, 9-10, 11, 12, 13-14

Geomyces destructans, 1

Gibbons, Ann, 1

GIEC, 1, 2, 3-4, 5, 6

Gila crassicauda, 1

Gill, Jacquelyn, 1

glaciation, 1-2, 3, 4, 5-6, 7, 8, 9, 10

Glaucopsyche xerces, 1

glouton, 1

gomphothère, 1

gorille, 1, 2, *3* , 4

Grand Rift est-africain, *1* , 2-3, 4, 5

Grande Coupure, 1

grands voyages de découverte, 1, 2, 3, 4,

gray goo, 1

grenouille, 1-2, 3, 4, 5-6, 7, 8

Grinnell, Joseph, 1

grippe espagnole, 1-2

Gubbio (site KT), 1, 2, 3

guerre (bactériologique), 1-2 ; (froide) 3 ; (nucléaire), 4, 5, 6-7, 8-9

gymnosperme, 1, 2, 3

H

habitat (destruction, fragmentation de l'), 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, *8* , 9, 10, 11-12, 13, 14, 15, 16, 17, 18-19, 20, 21-22, 23, 24 ; (protection de l'), 25, 26-27

Halieutichtys intermedius, 1

Haynes, Gary, 1

Hawaï (îles), 1, 2-3, 4, 5

Hildebrand, Alan, 1-2

Himalaya, 1, 2

Hippidion, 1

www.frenchpdf.com

hippopotame, 1, 2, 3, 4

hiver nucléaire, 1-2, 3, 4, 5

Hoffmann, Michael, 1-2

Holliday, Vance, 1

homme de Néandertal, 1, 2, 3, 4-5

homme de Tautavel, 1

Homo (genre), 1, 2, 3

Homo antecessor, 1

Homo erectus, 1, 2, 3-4, 5, 6, 7

Homo ergaster, 1-2, 3

Homo floresiensis, 1

Homo habilis, 1, 2

Homo heidelbergensis, 1, 2

Homo neanderthalensis, voir homme de Néandertal

Homo sapiens, 1-2, 3, 4-5, 6, 7-8, 9, 10, *11* , 12, 13, 14-15, 16-17 ; (extinction d'), 18-19

Homotherium, 1

Hoplodactylus delcourti, 1

Huet, Sylvestre, 1

huia, 1-2, 3 ; résurrection du, 4

huître, 1, 2

I

île (écosystème d'), 1, 2, 3, *4* , 5-6, 7-8, 9-10, 11-12, 13, 14, 15-16, 17, 18

impact (d'astéroïde, de comète), 1-2, 3, 4-5, 6-7, 8-9, 10, 11-12, 13, 14-15, 16, 17, 18, 19-20

Impey, Chris, 1

incendie, 1, 2 ; (lors de la crise KT), 3-4

insecte, 1, 2-3, 4, 5, 6, 7-8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17-18

intelligence artificielle, 1-2

interglaciaire, *voir stade*

invertébré, 1, 2, 3, 4, 5, 6

iridium (et couche KT), 1-2, 3, 4, 5, 6, 7, 8

isothermes (migration des), 1, 2-3

isotope (du carbone, de l'oxygène), 1, 2, 3

IUCN, *voir UICN*

ivoire (marché de l'), 1-2, 3

J

www.frenchpdf.com

Jefferson, Thomas, 1

Johnson, Christopher, 1

Jouzel, Jean, 1

Juruena (parc national de), 1

K

kangourou, 1, 2

kawekaweau, 1-2, 3

Keller, Gerta, 1

Kennedy, John, 1

Kennett, James, 1, 2

Khrouchtchev, Nikita, 1

Ki-moon, Ban, 1

Kollasmosoma sentur, 1

Krakatau (éruption du), 1, 2

KT, K/T ou K/Pg (crise, limite, couche d'argile), 1-2, 3, 4-5, 6-7, 8-9, 10-11, 12

Kubrick, Stanley, 1, 2

L

Lascaux (grotte), 1, 2-3

Lates niloticus, voir perche du Nil

Lehringen (éléphant de), 1

Léman (lac), 1

lémurien, 1, 2, 3-4, 5, 6, 7, 8-9

lépilémur septentrional, 1, 2

lézard, 1, 2-3, 4-5

lion des cavernes, *voir* Pantherea spelaea

Lipotes vexillifer, voir baiji

liste rouge des espèces menacées, 1, 2, 3, 4, 5-6

Loarie, Scott, 1

loup, *1* , 2, 3 ; de Tasmanie, voir thylacine

Lovelock, James, 1

Loxodonta, voir éléphant

Lucy (australopithèque), *1* , 2

Lynch's Crater, 1

lynx, 1, 2

www.frenchpdf.com

M

Macrauchenia, 1

Macropus, 1

Madagascar (extinctions à), 1, 2, 3, 4, 5-6, 7-8

Malawi (lac), 1

mammifère (extinction), 1, 2-3, 4, 5, 6, 7, 8-9, 10, 11, 12, 13, 14, 15-16, 17, 18-19 ; (recensement), 20, 21-22, 23-24, 25, 26-27, 28, 29, 30, 31, 32-33, 34-35, 36, 37, 38-39

mammouth, 1, 2, 3, 4-5, 6-7, 8, 9-10, *11* , 12, 13, *14* , 15, 16 ; (résurrection du), 17-18

Man (île de), 1

Manicouagan (cratère de), *1* , 2-3

Māori, 1-2

marin(e) (extinction), *1* , 2, 3, 4, 5, 6-7, 8-9, 10, 11, 12, 13

Mars (colonie humaine sur), 1-2

marsupial (mammifère), 1, 2, 3, 4, 5

Martin, Paul, 1, 2

Marton-Lefèvre, Julia, 1

mastodonte, 1, 2

Maurasse, Florentin, 1

Maurice (île), 1, 2, 3, *4* , 5, 6

maximum thermique du Paléocène-Éocène, 1-2, *3* , 4

McLean, Dewey, 1

méduse, 1, 2

mégafaune, 1-2, *3* , 4

mégafaune (extinction de la), 1, 2, 3-4, 5-6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15

Megaloceros, 1, 2, 3, 4

Megalocnus rodens, 1

Megatherium, 1

Meier, K. J. Sebastian, 1

Melanoplus spretus, *voir criquet des Rocheuses*

Melosh, Jay, 1

menacées (liste des espèces), *voir liste rouge*

Mésozoïque, 1, *2* , 3

méthane, 1, 2-3, 4, 5, 6, 7

Metridiochoerus, 1

Michel, Helen, 1, 2-3

micrométéorite, 1-2, 3

www.frenchpdf.com

migration (des espèces), 1, 2, 3-4

Milankovitch, Milutin (et cycles de), *1* , 2-3

mite du châtaignier, 1-2

moa, 1-2, *3* ; (résurrection du), 4

mollusque, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8-9, 10, 11

montagne (écosystème, refuge climatique), 1, 2, 3, 4-5, 6, 7

Montespan (grotte), 1

Monteverde (forêt de nuage de), 1-2

Mora, Camilo, 1

Moritz, Craig, 1

morue, 1, 2-3, 4

Moy, Andrew, 1

Musk, Elon, 1-2

mycète, 1-2

N

naine (espèce), nanisme, 1, 2, 3, 4, 5

nanotechnologie, 1

Neocnus rodens, 1

Nepstad, Dan, 1

Newell, Norman, 1

niveau marin (fluctuations du), 1-2, 3-4, 5, 6, 7, 8

Nouvelle-Zélande (extinctions en), 1-2, 3, 4-5, 6

Novacek, Michael, 1

O

obliquité (variation de l'), *1* , 2-3

océan (acidification de l'), 1, 2, 3, 4-5 ; (rôle climatique de l'), 6-7, 8-9, 10, 11, 12

Officer, Charles, 1

oiseau (extinction), 1, 2, 3-4, 5-6, 7, 8, 9, *10* , 11-12, 13, 14, 15-16 ; (géant), 17, *18* , 19-20, 21 ; (migration), 22-23, 24 ; (recensement), 25-26, 27, 28

Oligocène, *1* , 2, 3, 4-5, 6

olinguito, 1-2, *3*

omnivore (régime), 1-2, 3, 4

opinion publique (sondage), 1

Ordovicien (crise de la fin de l'), *1* , 2-3, 4

ordre, *1* , 2

www.frenchpdf.com

Oural, 1

ours, *1* , 2 ; (des cavernes), 3-4

oursin, 1, 2

oxygène (isotopes de l’), 1, 2-3, 4

P

PADD, 1

Paedophryne amauensis, 1

Paléocène (crise de la fin du), *1* , 2, 3-4, 5, 6

paléothère, 1

Paléozoïque, 1, *2* , 3

Panama (isthme de), 1

pandémie, 1-2, 3-4

Panthera spelaea, 1

Panthera tigris, voir tigre

papillon, 1, 2, 3-4, 5, 6-7, 8

Paranthrope, 1

paresseux géant, 1, 2, 3, 4, 5, 6

parmacelle de la Crau, 1

Pasteurella, 1, 2

Penfield, Glen, 1-2

perche du Nil, 1

pergélisol, 1-2, 3, 4

période glaciaire, 1, 2, 3, 4-5, 6, 7, 8-9, 10-11, 12, 13, 14-15, 16, 17-18, 19, 20

périssodactyle (ongulé), 1

Permien (crise de la fin du), 1-2, *3-4* , 5, 6, 7, 8

peste, 1-2

Peters, Charles, 1

PETM, *voir maximum thermique du Paléocène-Éocène*

Petrov, Stanislav, 1

phénologie (des espèces), 1

Phillips, John, 1-2

photosynthèse (arrêt de la), 1, 2, 3

phylogénie (définition), 1

pigeon migrateur, 1-2, 3, 4, 5-6, 7, 8

Pinatubo (éruption du), 1

www.frenchpdf.com

placentaire (mammifère), 1, 2

plancton, 1-2, 3, 4, 5, 6, 7, 8-9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 ; (et crise KT), 18, 19, 20-21, 22-23, 24-25, 26, 27

plante (extinction), 1, *2* , 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 ; (médicinale), 12 ; (recensement), 13, 14, 15, 16

Pléistocène, *1* , 2

Pleistocene Park, 1

Plimer, Ian, 1

Pliocène, *1* , 2

PLU, 1

pluie acide, 1, 2, 3

plutonium (et crise KT), 1

poisson (extinction), *1* , 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8-9, 10-11, 12-13, 14 ; (recensement), 15-16

pollinisation (insectes et), 1-2, 3-4

pollution, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9

Popigaï (cratère de), *1* , 2-3, 4-5, 6

population d'une espèce (densité, déclin), 1, 2, 3, 4-5, 6, 7, 8, 9-10, *11* , 12-13, 14, 15-16, 17, 18-19, 20, 21-22, 23-24, *25* , *26* , 27, 28-29, 30, 31-32, 33, 34, 35-36, 37

population humaine (essor et influence), 1, 2, 3-4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14-15, 16, 17

précession des équinoxes, *1* , 2-3

Pribilof (île de), 1

Primaire (ère), *voir Paléozoïque*

primate, 1, 2, 3-4, 5, 6, 7-8, 9, 10, 11, 12

protiste, 1

protoxyde d'azote, 1, 2

Pterinopelna sazimai, 1

Purgatorius, 1, *2*

Q

quartz choqué, 1, 2, 3, 4

quasi menacées (liste des espèces), *1* , 2, 3, 4

quota (de pêche, chasse), 1, 2

www.frenchpdf.com

R

Rampino, Michael, 1

Raphus cucullatus, *voir dodo*

rat (facteur d'extinction), 1, 2, 3

raz de marée, *voir tsunami*

Reagan, Ronald, 1, 2

recensement (des espèces), 1-2, 3, 4, 5-6, 7, 8-9, 10, 11, 12, 13-14

réchauffement climatique, 1, 2, 3, 4-5, 6-7, 8, 9, 10, 11-12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23-24, *25* , *26* , 27, 28-29

récif corallien, *voir corail*

refroidissement climatique, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7-8, 9, 10, 11, 12, 13-14

règne, *1* , 2-3

réintroduction (d'animaux), *voir repeuplement*

remembrement écologique, 1

Renne, Paul, 1

repeuplement, 1, 2, 3-4

reproduction (comme facteur d'extinction), 1, 2-3, 4, 5-6, 7, 8-9, 10, 11-12, 13, 14, 15

reptile (extinction), *1* , 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8-9, 10-11, 12 ; (recensement), 13, 14, 15, 16

requin, 1

rétroaction, 1

réserve animale, 1, 2-3, 4, 5, *6* , 7-8, 9, 10-11, 12-13, 14-15

résurrection (d'une espèce disparue), 1-2

Rheobatrachus, 1 ; (résurrection du), 2

rhinocéros, 1, 2, *3* , 4, 5-6, *7* , 8, 9-10, *11*

rhinocéros laineux, 1, 2, 3, 4

rhinopithèque (*Rhynopithecus strykeri*), 1

Robin, Éric, 1

Rocchia, Robert, 1

Rouffignac (grotte de), 1

Rule, Susan, 1

Russell, Dale, 1, 2

S

Sahelanthropus tchadensis, 1

saïga (*Saiga tatarica*), 1, 2, *3* , 4-5, 6

savane (expansion de la), 1, *2* , 3-4, 5 ; (morcellement de la), 6, 7, 8

www.frenchpdf.com

Schindewolf, Otto, 1, 2

sécheresse, 1, 2, 3, 4-5, 6-7, 8, 9-10

Secondaire (ère), *voir Mésozoïque*

Sepkoski, Jack, 1

serre, *voir effet de serre*

seuil, *voir effet de seuil*

Seychelles (îles), 1

Shirota, Yasuyuki, 1

Sibérie (trapps de), 1

singe, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7

Smilodon, 1

Smit, Jan, 1, 2-3

Smith, Felisa, 1

soufre, 1, 2-3

sous-espèce, 1, 2, 3-4, *5* , 6-7

sphérule d'impact, 1, 2, 3-4, 5, 6, 7, 8

spinelle d'impact, 1

Spirocerus, 1

Sporormiella, 1-2, *3* , 4

stade glaciaire, interglaciaire, *1* , 2, 3-4, 5, 6

Stegomastodon, 1

Stehlin, Hans, 1

Stephanorhinus, 1

Stevns Klint (site KT), 1, 2

stock (effondrement des – d'animaux), 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7-8

Stott, Lowell, 1

supernova, 1, 2-3

surchasse, surexploitaton, surpêche, 1, 2, 3, 4, *5* , 6, 7, 8

T

taille (comme facteur d'extinction), 1-2, 3-4, 5

Taïmyr (péninsule de), 1

Tambora (éruption du), 1, 2

tamia, 1

Tasmanie, 1, 2-3

tectonique des plaques (et climat), 1-2, 3

www.frenchpdf.com

Terre-Neuve, 1-2

Tertiaire (ère), *voir Cénozoïque*

thon, *1* , 2

thylacine (*Thylacinus cynocephalus*), 1-2 ; (résurrection du), 3

Thylacoleo carnifex, 1

tigre, 1, 2-3, *4-5* , 6, 7

tigre de Tasmanie, *voir thylacine*

tigre à dents de sabre, *voir* Smilodon

Toba (éruption du), 1-2

tortue, 1, 2, 3, 4-5, *6*

Toumaï, 1

toundra-steppe, 1

tourisme (éco –), 1, 2

trapp (crise volcanique), 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7

du Deccan, 1, 2, 3, 4, 5, 6

d'Éthiopie, 1, 2

de la Columbia River Plateau, 1

de Sibérie, 1

Trias (crise de la fin du), 1-2, *3* , 4

trilobite, *1* , 2-3

truite, 1, 2

tsunami (d'impact), 1, 2-3, 4

Turgaï (mer de), 1

Turkana (bassin de), 1

U

UICN, 1, 2, 3-4, 5, 6-7, 8-9, 10, 11, 12

uniformitarisme, 1

urbanisme, 1, 2, 3

V

vapeur d'eau (et effet de serre), 1-2

Vénus, 1, 2

Vermelhosa (gravure d'éléphant de), 1

Vermont (forêts du), 1-2

vertébré, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10

Vieilledent, Ghislain, 1

www.frenchpdf.com

vigne (et faucon), 1-2, *3*

Villmoare, Brian, 1

Viola lilliputana (violette), 1

virus, 1-2, 3, 4 ; (et pandémie), 5-6

volcan (et extinctions), 1-2, 3, 4, 5-6, 7-8, 9, 10-11, 12, 13, 14, 15, 16, 17-18

vulnérables (liste des espèces), *1* , 2-3, 4-5

W

Wells, H. G., 1

Wolbach, Wendy, 1

Wrangel (île de, mammouths de), 1, *2* , 3, 4

WWF, 1, *2*

X

xénope lisse, 1

Y

Yosemite (parc national de), 1-2

Z

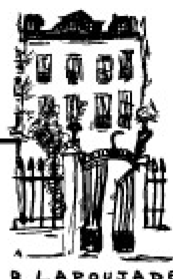
Zimov, Sergueï, 1

zone (d’occupation, d’occurrence), 1-2, 3, 4-5, 6

www.frenchpdf.com

SCIENCE
OUVERTE

Seuil



Découvrez Science ouverte

Cultivez un nouveau regard sur la science.

Créée en 1966 et dirigée depuis 1972 par Jean-Marc Lévy-Leblond, « Science ouverte » a pour ambition d'interroger les fonctions sociales de la science et de dévoiler leurs conditionnements pour allier la volonté de comprendre au désir de connaître.

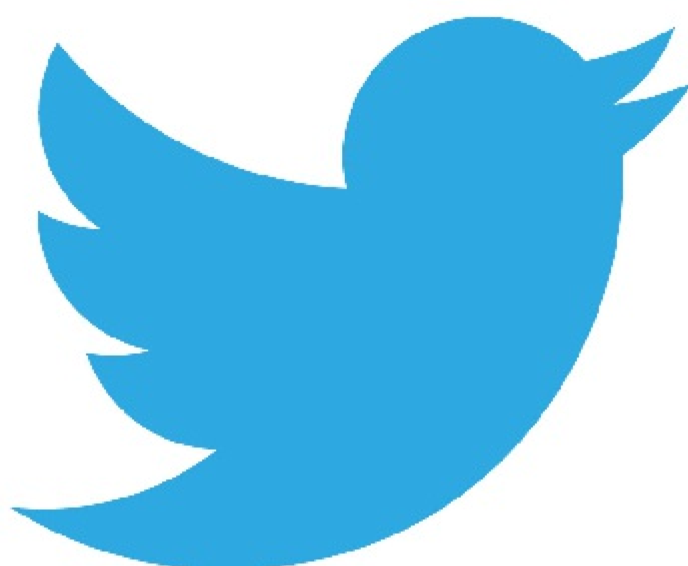
Découvrez les autres titres de la collection sur

www.seuil.com

Et suivez-nous sur :

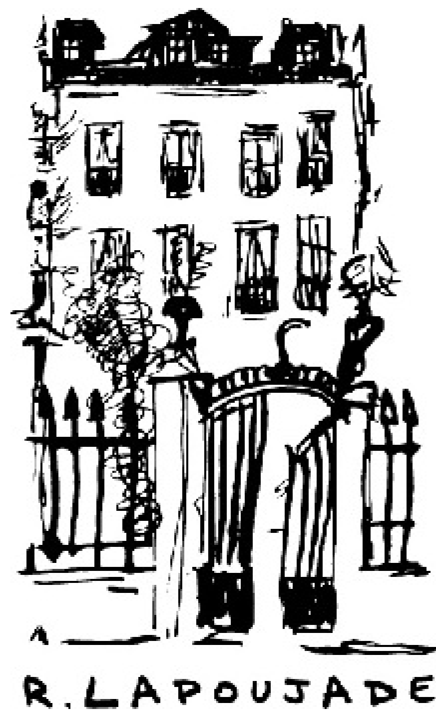


www.frenchpdf.com





www.frenchpdf.com



www.frenchpdf.com